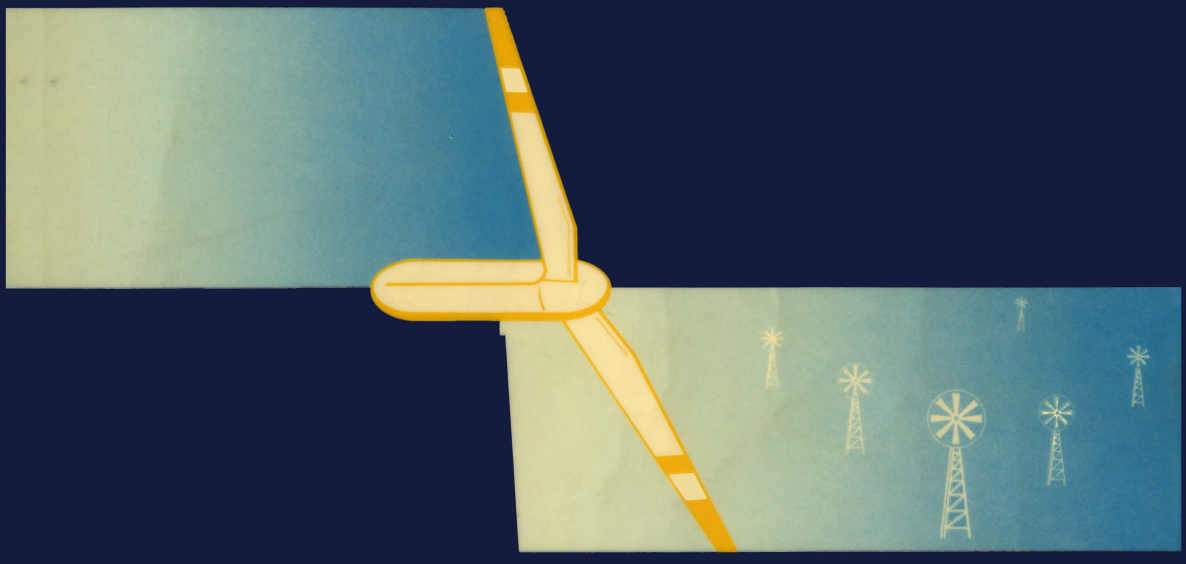
LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE DEMAIN

ÉNERGÉTIQUE ÉOLIENNE

Chauffage éolien • Production d'électricité • Pompage



Jean HLADIK

MASSON

Presses de l'Université du Québec

ÉNERGÉTIQUE ÉOLIENNE

Applications pratiques - Chauffage éolien
Production d'électricité - Pompage

DU MÊME AUTEUR

LA TRANSFORMATION DE LAPLACE A PLUSIEURS VARIABLES. 1969, Masson.

ÉLECTROCHIMIE DES SELS FONDUS. Tome 2. — Thermodynamique et cinétique aux électrodes. 1969, Masson.

PHYSICS OF ELECTROLYTES. 1972, Academic Press.
Tome 1. — Transport processes in solid electrolytes and electrodes.
Tome 2. — Thermodynamics and electrodes processes in solid state electrolytes.

LES PILES ÉLECTRIQUES. 1971, *Que sais-je ?*, P.U.F.

LES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES. 1977, *Que sais-je ?*, P.U.F.

LES TRANSFORMATIONS FONCTIONNELLES. 1970, Dunod.

ÉLÉMENTS DE CHIMIE QUANTITATIVE. 1971, Dunod.

LA BIOPHYSIQUE. 1980, *Que sais-je ?*, P.U.F.

RÉALISATIONS SOLAIRES EN MAINE-ET-LOIRE. 1981, Angers, C.E.D.R.E.

ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LA RÉGION DES PAYS DE LA LOIRE. 1982, Angers, C.E.D.R.E.

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Dans la même collection :

Voir p. 4 de couverture.

Autres ouvrages :

TRANSFERTS DE CHALEUR, par A. BOUVENOT. *Technologies de l'Université à l'Industrie.* 1981, 236 pages.

DICTIONNAIRE DE PHYSIQUE, par J.-P. MATHIEU, A. KASTLER et P. FLEURY. 1983, 576 pages.

LE MANAGEMENT DE L'ÉNERGIE, par P.A. BUIGUES, J. GOUSTY, J.B. LESOURD et M. VAGUE. 1981, 152 pages.

ÉCOLOGIE DES RESSOURCES NATURELLES, par F. RAMADE. *Écologie appliquée et sciences de l'environnement.* 1981. 360 pages.

MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES ET CALCULATRICES PROGRAMMABLES. Notation algébrique (TI 57, 58, 59) par L. SOLOMON et M. HOCQUEMILLER 1982, 264 pages.

MÉCANIQUE DES VIBRATIONS LINÉAIRES, avec exercices corrigés et méthodes de calcul, par M. LALANNE, P. BERTHIER et J. DER HAGOPIAN. 1980, 224 pages.

GÉOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT, par J. GOGUEL. *Écologie appliquée et sciences de l'environnement.* 1980, 200 pages.

Avant-propos

Cet ouvrage couvre l'ensemble des problèmes liés aux utilisations de l'énergie éolienne et à leur développement, tout en se limitant à leurs aspects les plus aisément accessibles. Plus orienté vers les applications pratiques que les calculs théoriques, ce livre s'adresse à des lecteurs non spécialisés dans le domaine éolien bien que des concepteurs de machines éoliennes pourront y puiser quelques idées originales ainsi qu'une bibliographie sur les brevets sélectionnant les inventions les plus marquantes dans le domaine éolien. De plus, pour ces concepteurs, l'étude de nouveaux systèmes énergétiques éoliens devrait les orienter vers le marché prometteur du chauffage éolien.

L'étude théorique des aéromoteurs (pales et système de régulation), et donc de l'optimisation pratique des performances des éoliennes, est actuellement bien maîtrisée, tout au moins pour les machines de petites et moyennes puissances. Par contre, l'étude des phénomènes instationnaires nécessite encore de nombreuses recherches théoriques, ce qui permettrait d'accroître la fiabilité des machines éoliennes et de prévoir leur longévité. Cependant, depuis de nombreuses années, la fabrication d'éoliennes de petites et moyennes puissances, jusqu'à une cinquantaine de kilowatts de puissance nominale, ayant de bonnes performances et des prix intéressants, est le fait de fabricants étrangers (Danemark, Suisse, U.S.A.) alors que les prix des éoliennes françaises sont excessifs.

Mais il ne suffit pas d'avoir un aéromoteur qui, des points de vue aérodynamique et technologique, soit excellent, encore faut-il l'utiliser de façon optimale. Plus précisément, il faut que cet aéromoteur soit couplé à un convertisseur énergétique (électrique, calorifique ou de pompage) optimisé et, de plus, que cette machine éolienne soit intégrée dans un complexe énergétique parfaitement adapté aux besoins auxquels il doit répondre.

Or l'expérience que nous avons acquise au Laboratoire d'Energétique Solaire de l'Université d'Angers, lors d'études sur des systèmes énergétiques utilisant des techniques aussi différentes que les capteurs solaires, les pompes à chaleur ou les serres, nous a montré que les performances d'une technologie énergétique donnée étaient largement tributaires de la conception et de la gestion de l'ensemble dans lequel elle se trouvait intégrée.

Pour ne retenir que l'exemple de la pompe à chaleur, on s'aperçoit que cette dernière est largement sous-performante dans de très nombreuses installations, principalement individuelles. Si des éléments essentiels de la pompe à chaleur ont atteint un niveau technique optimum, par contre c'est à la fois en amont et en aval du compresseur que l'optimisation est largement défaillante, ce qui conduit à des coefficients de performance moyens de l'ordre de l'unité ou éventuellement négatifs. En ce qui concerne le "potentiel thermique" utilisable, donc en amont de la pompe à chaleur, on se contente de sources calorifiques médiocres, tels que l'air extérieur ou les échangeurs enterrés travaillant à des températures trop basses; même pour de bonnes "sources thermiques", comme l'eau d'un puits, les évaporateurs sont rarement optimisés en fonction des débits. En aval, donc au niveau de l'utilisation des calories produites, les températures de distribution, pour le chauffage des locaux, sont trop élevées ce qui conduit à faire travailler les pompes à chaleur dans de mauvaises conditions. Le résultat final est qu'une technologie, par ailleurs bien maîtrisée, conduit à des performanances énergétiques et économiques souvent très médiocres.

Ne risque-t-il pas d'en être de même pour les machines éoliennes si l'on ne se préoccupe pas à la fois de l'amont - le potentiel éolien - et surtout de l'aval -les convertisseurs énergétiques, le stockage et la gestion de l'utilisation - ?.

Le "gisement éolien" est certes une donnée intrinsèque, pour un site fixé, et les turbulences dues aux obstacles du voisinage peuvent en général être évitées. Cependant, si l'on se limite aux installations individuelles, on constate que la plupart des pylônes proposés par les fabricants sont de faible hauteur alors que le potentiel éolien augmente avec l'altitude par rapport au sol. Les exemples d'installations domestiques américaines montrent souvent des pylônes haubannés de 25 à 30 m de hauteur, ce qui est rarement le cas en France.

En aval, l'utilisation de l'énergie "noble" qu'est l'énergie mécanique dont on dispose sur l'arbre d'un aéromoteur, ne peut-elle être mieux valorisée que par la production classique d'électricité ? Les besoins intrinsèques d'électricité, tant au niveau individuel que national, sont en réalité extrêmement faibles : alimentation de systèmes électroniques, éclairage, électrochimie et petits moteurs électriques. Les autres besoins, en particulier les besoins calorifiques, sont les plus importants, et ils peuvent être couverts grâce à d'autres vecteurs énergétiques. Les besoins en chaleur représentent l'essentiel de notre consommation énergétique et à lui seul le chauffage des locaux participe pour plus d'un tiers au bilan national des consommations.

Par suite du prix de revient du kilowatt-heure mécanique produit par une éolienne, ne faut-il pas rechercher la meilleure valorisation possible de cette énergie? Or l'utilisation calorifique de l'énergie éolienne semble actuellement, au niveau des installations individuelles ou de petites collectivités, la meilleure option. Les

convertisseurs mécanothermiques conduisent à de meilleurs rendements que les ɛemes électriques et les pompes à chaleur permettraient de multiplier par deux ou trois l'énergie fournie par une éolienne. D'autre part, le stockage thermique est actuellement le seul mode de stockage de l'énergie éolienne économiquement envisageable. De plus, l'utilisation au "fil du vent" de l'énergie électrique produite par une éolienne de chauffage est, à partir d'une certaine fraction de puissance par rapport à celle des besoins, bien moins performante que ne le permet un stockage thermique.

L'option du chauffage éolien a donc été particulièrement étudiée dans cet ouvrage. Cependant, nous n'avons pas négligé, loin de là, les aspects traditionnels de la production d'électricité qui, grâce aux nouveaux décrets permettant la vente de l'électricité basse tension à E.D.F, peut intéresser des auto-producteurs individuels ou des régies municipales. Le pompage de l'eau est également étudié et plus particulièrement le pompage par éoliennes rapides couplées à des pompes centrifuges.

Par suite de la diversité des problèmes que posent les utilisations de l'énergie éolienne, divers spécialistes ont participé à l'élaboration de cet ouvrage et nous les remercions vivement pour les articles qu'ils ont rédigés. L'avancée des techniques complexes, comme celles touchant à l'énergie éolienne, montre la nécessité d'une collaboration pluridisciplinaire.

Contents

WIND ENERGY

SPACE AND WATER HEATING-GENERATION OF ELECTRICITY
WATER PUMPING

FOREWORDS V
CHAPTER I - Wind Energy Program 1
CHAPTER II - Economics of Wind Power 12
CHAPTER III - Measuring and Calculating of Wind Energy 20
CHAPTER IV - Wind Resources of France 31
CHAPTER V - Horizontal-axis rotor 41
CHAPTER VI - Horizontal-axis Wind Turbines 55
CHAPTER VII - Vertical-axis Wind Turbines 71
CHAPTER VIII - Wind Machines Patents 86
CHAPTER IX - Characteristics for users 93
CHAPTER X - Space and Water Heating 63
CHAPTER XI - Generation of Electricity 133
CHAPTER XII - Coupling of Wind Turbines on National Grid 155
CHAPTER XIII - Water Pumping 170
CHAPTER XIV - Experimental Researches 180
CHAPTER XV - Prospects and Conclusion 192
BIBLIOGRAPHY 195
ALPHABETICAL INDEX OF CONTENTS 203

Table des matières

AVANT-PROPOS V

CHAPITRE PREMIER. - **Programmes éoliens** 1

I. - Une énergie renouvelable 1
II. - Le programme éolien de l'A.F.M.E. - M. BREMONT 5
III. - Le Centre National d'Essais de Lannion. - J.L. PAZY 7
IV. - La France prend du retard. - B. LE NAIL 8
V. - Des « fermes éoliennes ». - J.L. LE DOUARIN 9

CHAPITRE II. - **Données économiques** 12

I. - Les paramètres économiques 12
II. - Le prix des éoliennes 14
III. - Éoliennes françaises et étrangères 17

CHAPITRE III. - **Mesure et calcul de l'énergie éolienne** 20

I. - La mesure du vent 20
II. - Les données météorologiques 22
III. - Énergie éolienne moyenne annuelle 26
IV. - Influence de la hauteur et des sites sur l'énergie éolienne 27

CHAPITRE IV. - **Gisement éolien en France.** - Ph. DUCHENE-MARULLAZ 31

I. - Variations du vent à l'échelle de la France 31
II. - Énergie éolienne disponible en France 36
III. - Énergie éolienne récupérable 39
IV. - Conclusion 41

CHAPITRE V. - **Aéromoteur à axe horizontal** 42

I. - Action du vent sur les pales 42
II. - Les pales des éoliennes 45
III. - Rendement aérodynamique d'une pale 48
IV. - Puissance d'un moteur éolien 51

CHAPITRE VI. - **Éoliennes à axe horizontal** 55

I. - Types d'éoliennes à axe horizontal 55
II. - La fabrication des pales. - J. EUVRIE 56
III. - Les systèmes de régulation 59
IV. - Les systèmes d'orientation 66
V. - Les pylônes et les fondations 68

CHAPITRE VII. - **Éoliennes à axe vertical** 71

I. - Avantages et inconvénients de l'axe vertical 71
II. - Les éoliennes à traînée 73
III. - Les éoliennes Darrieus à aubes fixes 75
IV. - Les éoliennes Darrieus à aubes mobiles 82
V. - Couplage Savonius-Darrieus 84

CHAPITRE VIII. - **Brevets d'invention de machines éoliennes.** - M. Th. MALARTRE 86
I. - Dépôts de brevets et conjoncture énergétique 86
II. - Analyse des dépôts de brevets 87
III. - Principaux détenteurs de monopoles 88
IV. - Liste sélective de brevets 91

CHAPITRE IX. - **Caractéristiques d'utilisation des éoliennes** 93
I. - Les domaines d'utilisation des éoliennes 93
II. - Caractéristiques pratiques des éoliennes 94
III. - Fabricants français d'éoliennes 97
IV. - Les systèmes de conversion 97

CHAPITRE X. - **Le chauffage éolien** 103
I. - Intérêt du chauffage éolien 103
II. - Besoins de chauffage et énergie éolienne 105
III. - Techniques de conversion pour le chauffage. Production d'électricité 109
IV. - Conversion mécanothermique 115
V. - Conversion par courants de Foucault 118
VI. - Conversion thermodynamique. - M. SOULAS - J. HLADIK 119
VII. - Installations de chauffage éolien 124
VIII. - Modélisation du chauffage éolien 130

CHAPITRE XI. - **Production d'électricité** 133
I. - Les usages domestiques 133
II. - Les petits aérogénérateurs 136
III. - L'éclairage des phares et balises 139
IV. - Le dessalement de l'eau de mer 140
V. - La vente d'électricité à E.D.F. 141
VI. - Les réalisations d'E.D.F. 141
VII. - Les aérogénérateurs de moyenne et grande puissance 147
VIII. - Quelques exemples de grands aérogénérateurs 149

CHAPITRE XII. - **Possibilités de couplage de petits ou grands aérogénérateurs sur le réseau.** - P. LECLERE 155
I. - Introduction 155
II. - Petites machines domestiques 155
III. - Les grands aérogénérateurs 159
IV. - Données économiques pour les grands aérogénérateurs 163

CHAPITRE XIII. - **Le pompage de l'eau** 170
I. - Éoliennes multipales de pompage 170
II. - Éoliennes rapides de pompage 174
III. - Pompes centrifuges à arbre long 176

CHAPITRE XIV. - **Quelques recherches expérimentales** 180
I. - L'effet Magnus 180
II. - Éoliennes à axe vertical - Projet « Poséidon-L.180 » 181
III. - Système de compensation de mouvement de lacet 183
IV. - Recherches diverses 184
V. - Centrale éolienne à capteurs solaires à air 185
VI. - Éoliennes couplées aux pompes à chaleur 188
VII. - Systèmes augmentant l'énergie éolienne disponible 188
VIII. - Implantation d'éoliennes « off-shore » 191

CHAPITRE XV. - **Prospective et conclusion.** - L. ROMANI 192

BIBLIOGRAPHIE 195

INDEX ALPHABÉTIQUE 203

CHAPITRE PREMIER
Programmes éoliens

I. - UNE ENERGIE RENOUVELABLE.

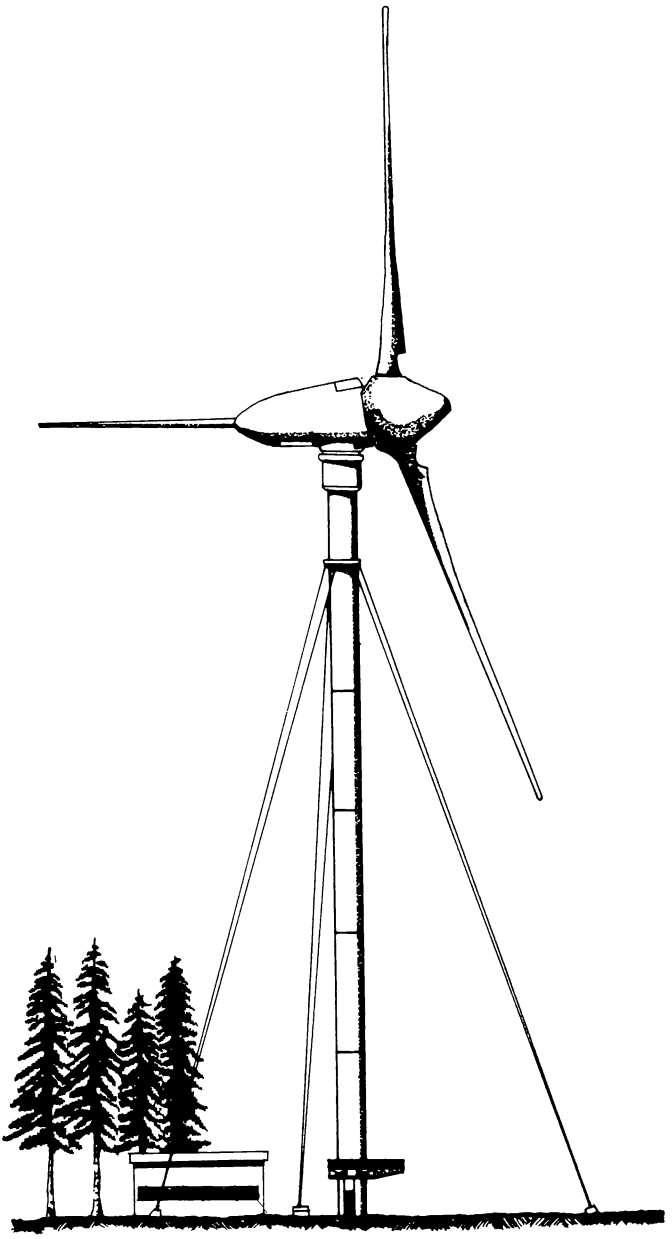
1. La cueillette et le stockage. - La production d'énergie à l'aide de moteurs éoliens constitue l'une des formes d'exploitation indirecte du rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre. La redécouverte de l'énergie éolienne s'inscrit dans le contexte des utilisations des énergies renouvelables dont le développement caractérisera, au point de vue énergétique, notre fin de siècle. Celui-ci aura été une transition annonçant, selon toute vraisemblance, la fin de la "cueillette" de l'énergie solaire stockée par la Nature.

Jusqu'à présent, en effet, nous nous sommes contentés de consommer les "fruits" du stockage photosynthétique (bois, végétaux, charbon, pétrole,etc) réalisé par la Nature ou d'utiliser le flux solaire sans vraiment le stocker artificiellement. Comme l'homme préhistorique, nous avons jusqu'ici, en ce qui concerne l'énergie solaire, procédé à la "cueillette" aléatoire de ce que nous offrait la Nature.

Sans doute vivons-nous la fin de cette préhistoire énergétique et le stockage maîtrisé des énergies renouvelables marquera, dans l'histoire des techniques, une étape peut-être aussi importante que celle où apparurent la culture et l'élevage remplaçant la cueillette des végétaux et la chasse. Cette transition énergétique ne se fera pas en quelques décennies mais qu'est-ce qu'un siècle ou deux dans l'histoire de l'évolution biologique.Certes les besoins sont pressants mais les stockages naturels ne sont pas encore épuisés et seront encore longtemps complémentaires des énergies renouvelables maîtrisées.

Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas de difficultés technologiques actuellement pratiquement surmontées, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

2. La production d'énergie d'origine éolienne. - Le gisement éolien est profondément modulé par le relief. Les bordures littorales et les îles présentent un maximum de potentiel éolien qui va en décroissant lorsqu'on se dirige vers l'intérieur des terres.



Aérogénérateur GROWIAN-I . République Fédérale Allemande -

Puissance nominale : 3 MW par vent de 11,8 m/s-Diamètre des pales : 100,4m

Production annuelle moyenne : 12 GWh

Par suite de son contexte océanique et méditerranéen, la France possède un gisement éolien important, principalement sur une bande côtière d'une centaine de kilomètre de large. Cependant, en se plaçant à une hauteur suffisamment importante on retrouve un gisement intérieur aussi élevé que sur les rivages à une hauteur bien moindre. A titre d'exemple, le gisement éolien au sommet de la Tour Eiffel est analogue à celui des côtes bretonnes mesuré à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol.

Les principaux arguments qui peuvent être relevés à l'avantage de la production d'énergie d'origine éolienne sont :

-l'énergie produite est une énergie "noble", mécanique ou électrique, utilisable de façon très diversifiée;

-des unités de production ayant des puissances de niveau industriel (1 à 2 mégawatts) sont réalisables dès à présent sans innovation technologique particulière;

-la dispersion de l'énergie éolienne favorise la régionalisation de la production énergétique et permet la création de petites unités très décentralisées ou individuelles;

-une économie de devises résulte de cette production nationale, une très faible fraction du prix de revient du kWh étant imputable en devises;

-les surfaces d'implantation au sol sont faibles comparées à d'autres modes d'exploitation des énergies renouvelables;

-une complémentarité entre l'énergie éolienne etsolaire directe est souhaitable;

-le coût des matériaux entre pour une fraction assez faible dans le prix de revient des éoliennes. La main-d'oeuvre nécessaire à la fabrication, la mise en place et la maintenance est créatrice d'emplois;

-la diversification maximum des resources énergétiques améliore la stabilité de l'écosystème humain et devrait s'imposer à plus ou moins long terme. C'est à la fois une volonté et un espoir de préserver l'avenir.

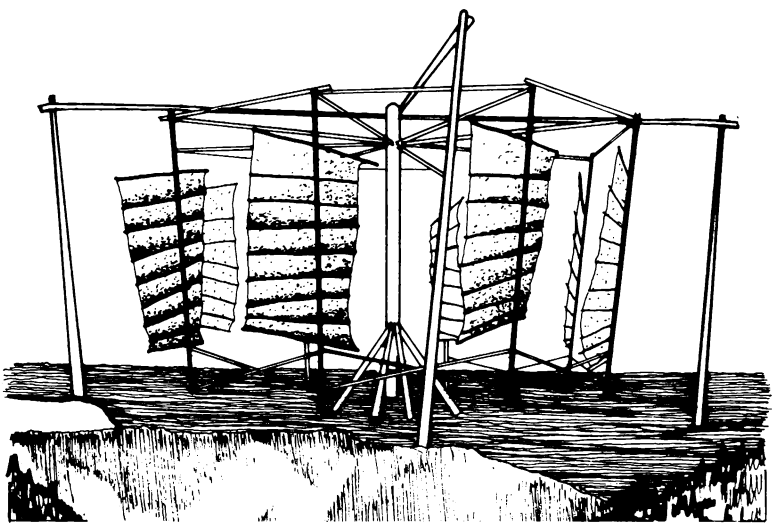
3. Investir durablement pour l'indépendance énergétique. - Les conceptions économiques classiques doivent-elles être appliquées sans modification aux systèmes utilisant les énergies renouvelables ? Des facteurs plus "ouverts" que ceux strictement économiques, tels que l'impact sur l'environnement, la sécurité d'approvisionnement, la considération des générations futures, la moindre fragilité par la dispersion et la diversification, la sécurité militaire,etc, sont déjà considérés par certains économistes. Mais ces facteurs doivent être évalués et pris en compte au niveau national et l'on doit alors faire intervenir des données politiques.

Les incitations financières, par des prêts de longue durée à faible taux d'intérêt, ont toujours été un facteur de base d'un développement volontariste d'une technologie. En ce qui concerne l'énergie éolienne, il devrait en être de même.

Des générations avant nous ont investi dans ce domaine et les technologies employées étaient d'une longévité exceptionnelle comparée à nos durées d'amortissement actuelles. Les exemples donnés par R. LEBLANC (1982) mettent bien ce fait en évidence : "le moulin du Nord, tel que celui de Hondschote, est un exemple de fiabilité rare pour une "machine". Il est en effet daté de 1127 et l'un de ses voisins, le moulin du cloître à Rexpoede, porte la date de 1101. Tous deux fonctionnaient encore après la deuxième guerre mondiale. On imagine difficilement l'énergie fournie par ces moulins dont la puissance pouvait atteindre 50 kW par bon vent !"

Le moteur éolien devait certes être changé périodiquement et c'est le pylône qui a franchi les siècles. Mais la poutre en chêne porteuse des ailes des moulins était remplacée seulement tous les cinquante ans et l'on trouve encore en Anjou des "arbres" du siècle dernier. Ces moulins tournaient lentement mais les grandes éoliennes ont également des vitesses lentes de rotation.

Des durées de fonctionnement de l'ordre de 20 ans sont communément admises pour des éoliennes classiques placées dans un environnement moyen. Une durée de vie de 30 ans est également avancée pour les grandes éoliennes américaines. L'infrastructure portante peut naturellement avoir des durées de vie bien supérieures. Une politique à long terme du développement des éoliennes suppose donc la possibilité d'investir durablement dans de bonnes conditions financières.



Ancien moulin à vent chinois à axe vertical

Utilisation de l'énergie éolienne il y a quelques deux mille ans

II. - LE PROGRAMME EOLIEN DE L'AGENCE FRANCAISE POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE.

par **Michel BREMONT**
Chargé de Mission
Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie

1. **Etat de l'art.** - La France dispose d'une industrie :

-d'éoliennes dont le chiffre d'affaires annuel est de 6 MF pour une production de 600 à 800 machines destinées essentiellement au marché intérieur (sauf HUMBLOT qui a exporté une usine en Algérie);

-d'aérogénérateurs dont le chiffre d'affaires est de l'ordre de 14 MF pour environ 400 machines produites chaque année. Plus de la moitié de ces machines sont exportées essentiellement par AEROWATT pour les aérogénérateurs supérieurs à 300 watts et par PROENGIN pour les "Savonius" de quelques dizaines de watts.

2. But et rôle de l'AFME. - Le but de l'AFME est de développer une industrie française d'éoliennes et d'aérogénérateurs compétitive sur le plan international et à volonté exportatrice.

La France est dotée d'un potentiel scientifique et technique tout à fait suffisant, en particulier au niveau de ses industries de pointe pour envisager un tel développement. On peut noter que la persistance de la crise économique, qui diminue particulièrement le plan de charges de notre industrie mécanique, permet d'envisager la fabrication d'éoliennes et d'aérogénérateurs comme une alternative crédible sur les plans :

-de la compatibilité des matériels et de l'utilisation des acquis de la Recherche, en particulier aéronautique;

-de la contribution au maintien du potentiel industriel existant;

-de la contribution à l'indépendance énergétique sur le plan national;

-de la contribution à l'équilibre de notre balance commerciale grâce à l'accroissement tout à fait envisageable de la politique d'exportation.

Le rôle de l'AFME consiste à rassembler et coordonner les potentiels de Recherche et de Développement Industriel en vue d'aboutir rapidement à des structures opérationnelles et efficaces fournissant les meilleurs chances de réussite.

Il ne peut être question, compte tenu de la dimension actuelle du marché, de disperser les fonds publics à des Centres de Recherches et des particuliers qui proposent la création de machines entières nouvelles, avec une expérience quasi-nulle. Si une telle approche peut être concevable pour une éolienne lente, elle est totalement irréalisable pour un aérogénérateur rapide ou pour arriver à une éolienne compétitive sur le plan international. Il faut maîtriser les problèmes :

-de l'instastionnaire et des phénomènes vibratoires associés;

-du calcul des pales et de leur réalisation, des études et essais de fatigue;

-de la régulation de la machine et de l'optimisation de son fonctionnement;

-des systèmes éoliens associés et de leur gestion;etc.

Tous ces problèmes forment un ensemble complexe à résoudre, auquel il faut ajouter des moyens d'expérimentation sur plusieurs prototypes avant d'aborder la phase de développement industriel qui, elle, nécessite une optimisation industrielle du produit : temps et méthode de fabrication des composants; durée d'assemblage, réglages, essais; réseau de distribution; service après vente; etc.

L'AFME a donc choisi :

-de concentrer ses efforts sur quelques constructeurs déjà expérimentés au programme de fabrication clairement défini et centré sur un petit nombre de machines, qui devront atteindre rapidement un niveau international de fiabilité et de compétivité;

-de pratiquer une politique de composants qui permet un accroissement de la rentabilité par effet de série, grâce à la vente à tous les constructeurs, et la possibilité pour tout Centre de Recherches, industriel, chercheur ou inventeur, d'apporter une contribution innovante dans son domaine de compétence à notre effort de développement de l'énergie éolienne.

3. Moyens de l'AFME. - Un Comité d'experts, composé de quatorze personnalités reconnues pour leurs compétence dans le domaine éolien, conseille l'AFME dans ses choix, en particulier pour les appels d'offre de Recherche et les consultations de Développement Industriel.

Le budget éolien a été le suivant : en 1981 : 2MF; en 1982 : 7,5 MF; en 1983, il est prévu à hauteur de 13 MF. Il faut noter la volonté de la Direction de l'AFME d'augmenter le budget éolien du fait d'une croissance rapide prévisible due au coût intéressant du kWh fourni.

Le Service des Actions Internationales et le Service des DOM-TOM de l'AFME permettent de définir les besoins et d'orienter notre politique technique; d'offrir une structure d'aide à nos industriels pour leur politique commerciale. Leurs actions et les projets qu'ils ont déjà permis de réaliser sont particulièrement importants pour le développement d'une industrie française de l'énergie éolienne.

4. Conclusion. - La politique du développement d'une telle industrie française, réussira d'autant mieux que notre interlocuteur privilégié, Electricité de France, montrera sa volonté de coopérer à l'effort national. Il existe en particulier, d'ores et déjà, des lieux : îles de nombreux DOM-TOM, où l'installation d'aérogénérateurs de petite ou moyenne puissance, est une opération rentable. Seule une politique de

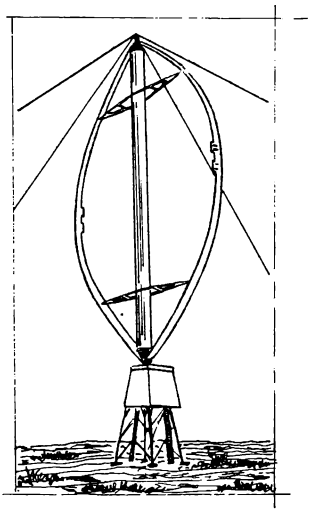
démonstration rapide en plusieurs endroits permettrait :

-de démontrer l'intérêt de ce mode de conversion;

-de participer à l'effort industriel national;

-de lancer des séries plus compétitives sur le plan international et d'assurer des rentrées de devises;

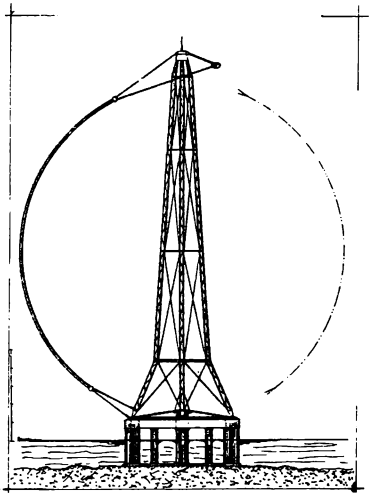
-d'assister l'AFME sur son programme d'aérogénérateur de 250 kVA.



Eolienne Darrieus des Iles de la Madeleine Canada

Hauteur : 36,3 m

Puissance : 100 kW (12 m/s)



Projet d'éolienne Darrieus implantée en mer. Suède

Hauteur : 180 m

Puissance : 20 MW

Utilisation de l'énergie éolienne aux XXème et XXIème siècles.

III. - LE CENTRE NATIONAL D'ESSAIS EOLIENS DE LANNION.

par **Jean-Louis PLAZY**
Chargé de Mission
Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie

1. Les objectifs. - La mise en place progressive d'un programme éolien significatif par le COMES, puis l'AFME, a conduit dès la fin de l'année 1980 à entreprendre une action pour la création d'un Centre National d'Essais Eoliens afin de répondre aux objectifs suivants :

-permettre aux constructeurs d'essayer des prototypes ou des machines commercialisées en vue d'accroître leur fiabilité et leurs performances;

-attribuer aux machines commercialisables ou commercialisées un avis technique permettant : aux constructeurs de promouvoir leurs machines sur la base de résultats d'essais unanimement reconnus; aux usagers d'obtenir des garanties sur les performances et la fiabilité des machines et de faciliter leur choix; aux Pouvoirs Publics, d'orienter la politique de développement et de diffusion.

-mettre au point des méthodes d'essais permettant à la fois : de comparer les performances et la tenue des machines dans des conditions similaires d'emploi; d'aboutir à plus long terme à une normalisation pour l'essai et la caractérisation des éoliennes. constituer une vitrine pour les machines françaises; de façon plus générale, de mener des études d'amélioration et de développement des capteurs d'énergie éolienne (hors conception).

2. Les critères. - Pour constituer ce centre, plusieurs critères ont été pris en compte :

-réunir des équipes qualifiées à la fois dans le domaine éolien et en métrologie

-disposer d'un site à potentiel éolien favorable;

-conserver la neutralité vis-à-vis des constructeurs d'éoliennes pour assurer l'objectivité des essais.

Il en est résulté le choix du site de Lannion et la constitution d'un Groupement d'Intérêt Economique qui comprend :

-l'Université de Rennes (I.U.T. de Lannion);

-le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (Etablissement de Nantes);

-la Chambre de Commerce et d'Industrie des Côtes du Nord;

-l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie.

3. Le fonctionnement. - La gestion du Centre sera basée sur les principes suivants : associer au Centre la compétence d'équipes qualifiées en dehors des seuls membres du G.I.E. par des associations sous forme de conventions; autonomie financière à terme du Centre, ce qui implique la rémunération des prestations; mise en place par l'AFME d'aides aux constructeurs pour faire réaliser les essais; priorité aux essais d'éoliennes.

IV. - LA FRANCE PREND DU RETARD.

par **Bernard LE NAIL**
Secrétaire Général
du Comité d'Etude et de Liaison des Intérêts Bretons

...Le budget éolien français est resté absolument négligeable jusqu'ici : 1 à 2 millions de francs en 1980 et 1981 et 7,5 MF en 1982. Le seul évènement notable a été en 1976, à l'initiative de la Délégation aux Energies Nouvelles, la décision d'EDF et de l'Agence pour les Economies d'Energie, de mettre en place un aérogénérateur de 100 kW à Ouessant. Le projet fut confié, sans aucun appel

d'offre, à AEROWATT, filiale à 70% du Commissariat à l'Energie Atomique, qui n'avait construit que de très petits aérogénérateurs, de 200 à 4800 watts. Installé en Octobre 1979, l'aérogénérateur d'AEROWATT connaissait de nombreux incidents mécaniques et s'écroulait le 9 juillet 1980, après seulement quelques heures de fonctionnement. Un aérogénérateur identique installé par le C.E.A. à Biscarosse connaissait lui aussi un grave incident, à quelques jours d'intervalle...

...Une étude du Stanford Research Institute, terminée en février 1982, estime le marché éolien mondial à 50 milliards de dollars (350 milliards de francs!) dans les 20 prochaines années, soit une capacité éolienne de 50 000 mégawatts à installer.... La France, et particulièrement la Bretagne, doivent prendre place sur ce marché.

Cela suppose qu'une politique éolienne ambitieuse soit engagée dès à présent et que des sommes significatives soient consacrées dès 1983 à cette énergie 100% nationale, dont le développement sera immédiatement créateur d'emplois et valorisateur de notre potentiel industriel et scientifique.

Le petit Danemark a consacré 29 millions de couronnes (22 MF) à son programme éolien et les compagnies d'électricité 9 Mkr (6,8 MF) pour la seule période 1977-1980. Rapporté à l'échelle de la France, cela supposerait un budget éolien français de 50 à 60 MF par an. Le programme éolien ouest-allemand était estimé en 1979 à 16 millions de marks pour les petites machines et 132 millions pour les grandes, soit au total 148 MDM (environ 400 MF). Pour la seule année 1980, le budget éolien de la République Fédérale s'est élevé à 54 millions de DM (150 MF). La Suède, elle, avec moins de 9 millions d'habitants, a prévu d'investir 250 millions de couronnes (285 MF) dans l'énergie éolienne de 1978 à 1984.

Si la France se décidait à consentir un effort comparable, proportionnel à son potentiel industriel et à sa population, c'est cette somme là qu'elle devrait consacrer chaque année à l'énergie éolienne. On en est loin : à l'issue du premier séminaire organisé à ce sujet dans les locaux de l'AFME à Sophia-Antipolis, le budget éolien 1983 était rendu public : 13 millions de francs!

(Extraits d'un article paru dans la revue "ACTION SOLAIRE"-Nov.Déc. 1982-)

V. - DES "FERMES EOLIENNES".

par **Jean-Luc LE DOUARIN**
Président du Comité d'Etude et de Liaison des Intérêts Bretons
Vice-Président de la Chambre de Commerce et d'Industrie du Morbihan

...L'idée d'exploiter au moyen de batteries de machines les bons gisements éoliens ne date pas d'aujourd'hui. Il suffit de se rendre aux Pays-Bas, par exemple dans la région du Zaan, à côté d'Amsterdam, pour voir des moulins à vent en série...Le

seul arrondissement de Paimboeuf, en Loire-Atlantique, comptait, lui, 140 moulins à vent vers 1850. Il n'est donc pas absurde, ni révolutionnaire, d'imaginer demain des centaines d'aérogénérateurs dans certains paysages de Bretagne et d'autres régions françaises, correspondant à de bons gisements éoliens.

... Deux ingénieurs de Burlington, dans le Massachussetts, Stanley CHARREN et Russel WOLF, ont créé, en 1974, une entreprise précisément dans le but d'installer des "fermes éoliennes" ("windfarms"), l'idée étant d'assimiler la production d'énergie dans un espace donné à une production de maïs, de viande ou de lait. On "récolte" des kilowtts-heures. Ils ont créé la première ferme éolienne du monde sur les pentes d'une montagne, Crotched Mountain,(New-Hampshire), sans aucune subvention mais uniquement avec des fonds privés, en implantant 20 éoliennes qui produisent environ 1,5 million de kilowatts-heures par an. Il s'agit d'éoliennes tripales dont les pales font 12m de diamètre et sont en résine armée de fibre de verre, et dont les pylônes, composés de trois tubes d'acier, ont 18 m de hauteur. L'ensemble est très discret et, comme le soulignent les deux entrepreneurs, qui ont obtenu l'accord de la municipalité de Greenfield, c'est une centrale qui récolte de l'énergie sans causer de pollution atmosphérique et sans produire de déchets.

(d'autres "fermes éoliennes" ont suivi)...U.S.WINDPOWER a donc trouvé des investisseurs et installé déjà 100 aérogénérateurs à Altamont Pass, près de Livermore (Californie) dans un très bon site où il est prévu, à terme, d'avoir 600 machines, ce qui occupera 1000 acres (400 hectares). L'énergie produite est vendue à la Pacific Gas and Electric Company, dont le siège est à San Francisco. Il s'agit là, en fait, de petites machines de 40 kW de puissance nominale moyenne, mais la première tranche de cette "ferme éolienne" représentera tout de même une puissance de 30 mégawatts, ce qui déjà n'est pas rien.

D'autres "fermiers éoliens" (windfarmers) sont apparus aux Etats-Unis ces dernières années. Ainsi ZOND ALTERNATE ENERGY SOURCES prévoit d'exploiter bientôt une ferme éolienne de 25 MW, sur 300 acres (120 ha) à Tehachapi (Californie) et 15 machines de 40 kW sont déjà en service sur ce site.

... WINDFARMS a passé un accord avec PACIFIC GAS AND ELECTRIC COMPANY pour la réalisation d'une centrale de 350 MW dans le comté de Solano, à l'Est de San Francisco, sur un terrain de 5000 acres (2000 hectares), au sud de la petite ville de Fairfield. 146 aérogénérateurs produiront l'électricité correspondant aux besoins moyens de 150 000 foyers, permettant d'économiser ainsi 1 600 000 barils de pétrole par an.

Le grand problème des centrales éoliennes est en fait celui du coût des investissements. Les études américaines les plus récentes donnent les estimations suivantes

-énergie nucléaire : 1 200 dollars par kilowatt installé;
-énergie éolienne : 2 500 à 3 000 $/kW
-énergie hydro-électrique : 2 500 $/kW
-centrale électrique au fioul : 900 à 1 200 $/kW
-centrale thermique au charbon : 490 à 600 $/kW.

...Quittons maintenant l'Amérique pour se rapprocher de chez nous et voir ce qui se passe en Europe. De nombreuses fermes éoliennes y sont à l'étude ou en projet chez la plupart de nos voisins.

A la fin de 1983, une petite ferme éolienne de 500 kW, composée de 10 aérogénérateurs ENEL-FIAT de 50 kW, entrera en service en Sardaigne, à Alta Nurra. Déjà, depuis le 5 Juin 1982, une petite "ferme éolienne" de 100 kW, composée de 5 aérogénérateurs AEROMAN de 20 kW, est entrée en service en Grèce, dans l'île de Kythnos, dans le Cyclades.

... Mais ces exemples sont ceux de réseaux autonomes. Il est intéressant de constater que plusieurs pays européens envisagent la construction de "fermes éoliennes" raccordées au réseau général d'électricité, alimentées par ailleurs par des centrales nucléaires, des centrales thermiques au charbon et au fioul et des centrales hydro-électriques.

C'est le cas de la Grande-Bretagne qui va lancer l'an prochain (en 1983), un appel d'offres pour une première machine d'un mégawatt et qui prévoit de coupler au réseau en 1990, une première "ferme éolienne" de 10 MW, constituée de 10 machines de 1 MW.Le Danemark, la Suède et l'Allemagne Fédérale envisagent la construction de centaines, voire de milliers de machines, regroupées en "fermes éoliennes", dès que les prototypes actuels de 630 kW, 2 et 3 MW auront fait la preuve de leur intérêt économique.

Mais c'est auxPays-Bas que la première "ferme éolienne" raccordée au réseau général verra bientôt le jour. Ce pays, qui a exactement la même taille que la Bretagne (34 000 km²) et sensiblement le même potentiel éolien, prévoit d'installer, d'ici à l'an 2000, mille à deux mille grosses machines, donnant une puissance totale de 2 000 MW et 15 000 machines plus petites, donnant une puissance totale de 450 mégawatts. En l'an 2000, 8% de l'électricité des Pays-Bas viendra du vent....

(Extraits de l'exposé :"Intérêt économique du développement d'aérogénérateurs de moyenne et grande puissance" fait par J.L. LE DOUARIN. Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982).

CHAPITRE II
Données économiques

I. - LES PARAMETRES ECONOMIQUES.

1. La consommation d'énergie. - Après une augmentation rapide de la consommation d'énergie primaire en France au cours des dernières décennies, cette consommation est en baisse depuis 1980, donc pour la troisième année consécutive. Cette diminution est de l'ordre de 1,5 % en 1982 par rapport à 1981, alors que la croissance économique est estimée par l'INSEE à 1,3 % pour l'année 1982.

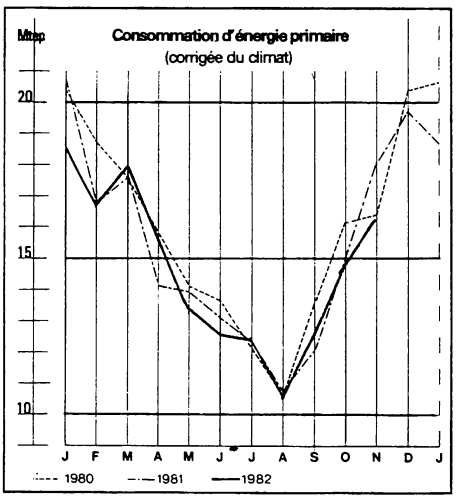
De 1979 à 1982, la baisse de consommation approche 5% tandis que le produit intérieur brut marchand progresse de près de 3%. La consommation d'énergie en 1982 est donc inférieure d'environ 30 Mtep par rapport aux chiffres qui résultaient de l'extrapolation des tendances observées antérieurement à 1973. L'accumulation des effets de la récession et de la politique d'économies d'énergie se traduit donc dans une telle évolution.

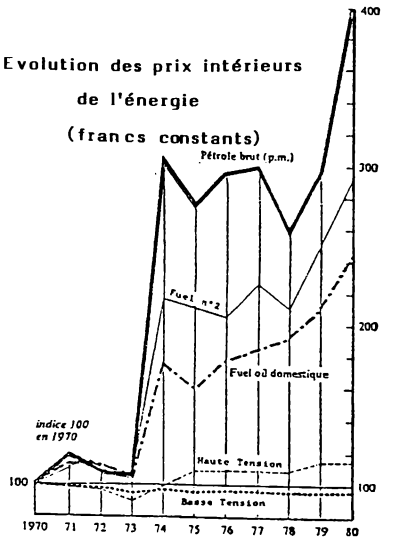
Cette baisse de la consommation va-t-elle engendrer un fléchissement important du prix de l'énergie ou au contraire la tendance à la hausse va-t-elle se poursuivre? Si nous sommes dans une période de calme relatif, il est vraisemblable que le prix de l'énergie continuera à s'élever .

La consommation d'énergie primaire varie fortement au cours des mois durant une année, le minimum de consommation se situant au mois d'août et le maximum en décembre ou janvier. Les consommations de chaque type d'énergie, charbon, gaz, électricté,etc, suivent le même rythme annuel sauf les carburants automobiles qui présentent un maximum de consommation en juillet.

2. Evolution du prix de l'énergie. - Le prix des combustibles fossiles a considérablement augmenté, en francs constants, durant ces vingt dernières années. Un schéma montre l'évolution des prix pour les produits pétroliers; à titre d'exemple, le fuel lourd n°2 est passé de l'indice 100 à l'indice 290 entre 1970 et 1980.

Le renchérissement de l'énergie conduit à investir dans des systèmes producteur d'énergie, permettant de réduire les dépenses énergétiques futures, et ceci s'applique tout particulièrement aux systèmes éoliens qui demandent des investissements importants.





Par définition, si v_p est le prix d'un bien ou d'un service à l'année p et v_o son prix à l'année zéro, on appelle taux annuel moyen d'enchérissement entre les années 0 et p, le coefficient j , tel que :

$$v_p = v_o [1+j]^p$$

Par exemple, pour le fuel lourd n°2, v_o = 100 en 1970 (année zéro) et v_p = 290 en 1980 (année p), d'où :

$$j = [\ 290/100\ ]^{1/10} - 1 = 0{,}11$$

Le taux annuel moyen d'enchérissement est donc de 11 %. Ce taux a été de 7,1% entre 1960 et 1977.

3. Valeur actuelle des biens et services. - Quand une banque prête une somme S_o avec un taux d'intérêt i et que nous lui rendrons dans p années, la somme S_p :

$$S_p = S_o\ [\ 1+i\ ]^p$$

on peut dire que S_o est la "valeur actuelle" de la somme S_p ;en d'autres termes il est financièrement équivalent de disposer aujourd'hui d'une somme S_o ou dans p années de la somme S_p.

En généralisant ce raisonnement à tous les biens ou services échangés, on peut définir un coefficent d'équivalence entre un bien de valeur S_o échangé aujourd' hui et un bien de valeur S_p échangé dans p années, en posant :

$$S_o = S_p / [\ 1 + a\ ]^p$$

a s'appelle le "taux d'actualisation moyen" sur les p années. Ce calcul intervient pour avoir une estimation de la valeur actuelle de l'énergie fournie par les éoliennes au cours de N années de fonctionnement ainsi que pour le prix de leur maintenance.

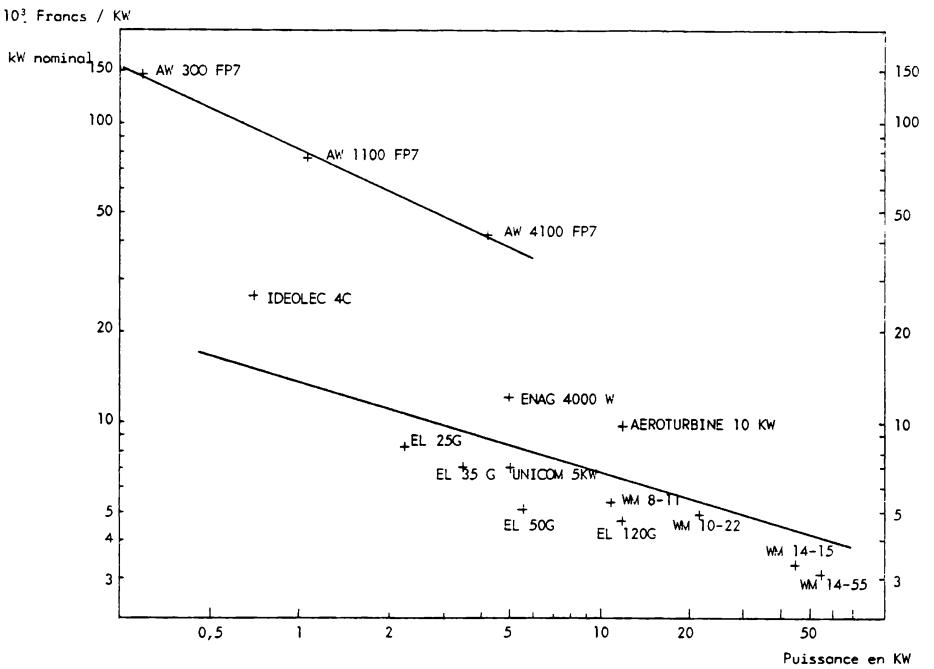
II. - LE PRIX DES EOLIENNES.

1. Estimation approchée. - Afin de pouvoir comparer des éoliennes de différent diamètre entre elles, il semble intéressant de ramener les calculs économiques à 1 m² de surface balayée par les pales (J. HLADIK et coll. 1981). Connaissant le nombre E de kilowatts-heures fournis par une éolienne de surface rotorique S, au cours d'une année moyenne, on aura évidemment par m² : X = E/S. Le calcul de E dépendra de divers paramètres : distribution statistique des vitesses de vent sur le site d'implantation, hauteur du pylône, facteur de conversion de l'éolienne, taux d'utilisation. La valeur de X peut donc être déterminée à partir de données connues.

Le prix de l'énergie fournie par l'éolienne, durant N années de fonctionnement, peut donc, en toute première approximation, être estimée à partir du prix actuel R du kWh. On aura :

$$I = N \times R$$

A titre d'exemple, pour un prix moyen de 0,30 franc par kWh; une énergie d'origine éolienne effectivement utilisable de 250 kWh/m².an; une durée de fonctionne-



Prix du kW nominal des éoliennes en fonction de la puissance nominale

EL : Elektro (Suisse) - AW : Aérowatt (France) - WM : Wind-Matic (Danemark) - IDEOLEC : Humblot (France) - Prix 1981 -

ment de 20 ans, le prix de l'énergie fournie par m² de surface rotorique est égal à 1500 francs.

Cette somme doit être égale à l'investissement initial I, rapporté au m² de surface rotorique, pour que l'amortissement sur 20 ans soit égal au prix de l'énergie récupérée. On n'a pas tenu compte dans cette estimation des coûts de la maintenance. De plus, un tel calcul suppose que le taux d'enchérissement de l'énergie soit égal au taux d'actualisation.

Pour une éolienne de 6 m de diamètre, qui balaye une surface S = 28,27 m² le prix total de l'énergie récupéré sur 20 ans de fonctionnement sera :

$$I_M = 1500.\ 28{,}27 = 42\ 410 \text{ francs}$$

Ce prix est bien en-deça de celui des éoliennes actuelles d'un tel diamètre. Pour obtenir un prix maximum I_M d'investissement, il faut que l'énergie récupérable soit éventuellement supérieure à celle considérée. D'autre part, compte tenu de l'enchérissement du prix de l'énergie, l'investissement initial peut être plus élevé.

2. Influence des paramètres financiers. - Par suite de l'enchérissement du prix de l'énergie, la somme investie aujourd'hui pour l'achat d'une éolienne "rapporte" de l'énergie qui est payée au prix actuel mais qui vaudra plus cher par la suite. De plus, le taux d'intérêt réel de l'argent placé par les particuliers est souvent très faible, souvent même il est négatif. Ainsi, un taux d'intérêt à 7% alors que le taux d'inflation est de 12% revient à avoir un "intérêt" annuel négatif de -5%.

On peut donc affiner le calcul précédent en considérant à présent les conditions suivantes : taux d'enchérissement de l'énergie : j=10%; taux personnel d'actualisation : -5% ; coût de la maintenance : 1% annuellement de l'investissement initial; taux d'enchérissement du coût de la maintenance : j°=5%; Les autres paramètres sont identiques : N=20 ans; X = 250 kWh/m².an; S = 28,27 m² On obtient alors un investissement initial maximum de : I_M = 165 210 francs

Comparée à la précédente somme de 42 410 francs, ce prix actualisé de l'énergie produite par l'éolienne montre l'importance des paramètres financiers lorsque l'on considère des investissements dont l'amortissement est étalé sur un grand nombre d'années.Cette dernière somme est déjà plus proche du prix des éoliennes actuelles de cette dimension et dont les prix, sur le marché français, devraient diminuer.

3. Bénéfice actualisé nul. - Lorsque l'investissement initial est égal à la somme actualisée de l'énergie produite et des frais de maintenance durant les N années de fonctionnement, le "bénéfice actualisé" de l'opération est nul. Dans ce cas, on peut calculer l'investissement correspondant I_M en multipliant le prix actuel de l'énergie produite par un coefficient correctif, B , prenant en compte les divers

paramètres financiers. On a : (J.HLADIK et coll. 1981) :

$$I_M = [\ N\ R\ X\ ]\ B$$

Cette formule donnant l'investissement maximum correspondant à une bénéfice actualisé nul montre l'importance :

-du régime des vents et du facteur de conversion de l'éolienne, l'énergie X dépendant directement de ces paramètres;

-du prix de l'énergie R à l'époque de l'investissement;

-de l'influence des paramètres financiers (facteur B).

A titre d'exemple, on a les valeurs suivantes de I_M pour les paramètres suivants : R=0,30 franc; X= 250 kWh/m²/an; N=20; j=10%; frais de maintenance : 1% annuellement de l'investissement initial :

taux d'actualisation	0,10	0,05	0	-0,05
I_M (francs)	1330	2111	3507	5844

Le calcul de I_M pour d'autres valeurs des coefficients R et X se déduit aisément des valeurs ci-dessus par une simple règle de proportionnalité.

Une estimation du prix total d'un équipement éolien, pour le chauffage électrique en complément d'un chauffage déjà installé, a été faite pour diverses éoliennes. Ces prix (tarifs 1981) comprennent outre l'éolienne et le pylône de 15 m, l'ensemble des accessoires électriques de contrôle, les câbles, le transport et l'emballage. Une estimation de 25% de frais supplémentaires, calculés sur le prix de l'éolienne et du pylône, a ensuite été ajoutée pour les fondations et la mise en place. On obtient les valeurs suivantes pour diverses éoliennes françaises et étrangère.

EOLIENNES	PRIX MATERIEL (francs) 1981	PRIX TOTAL (francs) 1981	SURFACE ROTORIQUE (m2)	PRIX/m2 SURFACE ROTORIQUE
ELEKTRO 120 G	86 198	107 747	28,27	3 811
ELEKTRO 50 G	51 845	61 440	19,69	3 120
DUNLITE 5 kW	69 074	81 866	24,63	3 323
AEROTURBINE 10 kW	155 232	194 040	50,26	3 860
WIND-MATIC 8-11	112 294	133 089	50,26	2 648
WIND-MATIC 14-45	287 115	340 285	153,9	2 211
ENAG 6kW	114 836	143 544	28,27	5 077
IDEOLEC 3000-8	25 112	31 390	10,18	3 083

La comparaison des valeurs de ce tableau et des prix obtenus par le calcul de l'énergie produite donnant I_M doit se faire avec prudence, car toutes ces éoliennes donneront des énergies disponibles différentes pour un même site (voir chapitres suivants).

De manière assez approximative, mais pour situer un ordre de grandeur, on peut conclure qu'en-deça d'une énergie disponible de 250 kWh/m².an et pour un taux d'actualisation personnel compris entre 0 et 5%, le prix des éoliennes est actuellement dissuassif, en termes économiques traditionnels.

De plus, les éoliennes Elektro, Dunlite et Wind-Matic sont respectivement suisses, australiennes et danoises. Il serait indispensable que les prix et la qualité des machines françaises s'alignent sur ceux de leurs concurrents étrangers.

III. - EOLIENNES FRANCAISES ET ETRANGERES.

Le prix des éoliennes françaises est actuellement nettement supérieur à celui de leurs concurrents étrangers. Le marché intérieur français pour ce type de machines est en effet très restreint alors qu'il se développe dans des pays tels que le Danemark ou les Etats-Unis. Diverses études américaines (L.V. DIVONE. 1980) indiquent que les aérogénérateurs seront compétitifs avec les autres systèmes énergétiques lorsqu'ils seront construit en série.

1. Investissement par kilowatt nominal. - Le prix par kilowatt installé est un indicateur économique classiques parmi ceux utilisés couramment. Sur le graphique suivant, on a effectué une comparaison du prix du kilowatt nominal, en fonction de la puissance nominale, pour diverses éoliennes françaises et étrangères (prix et taux de change 1981). Les prix indiqués concernent les aérogénérateurs seuls, donc ne comprenant pas : l'emballage et le transport, le pylône et son installation avec les fondations, l'installation électrique complémentaire.

Ce graphique appelle les remarques suivantes :

-le prix du kilowatt nominal des éoliennes françaises est nettement plus élevé que celui des machines étrangères;

-on observe une diminution caractéristique du prix du kilowatt en fonction de la puissance des éoliennes.

La comparaison de ces coûts avec d'autres types d'installations énergétiques, les centrales hydrauliques par exemple, est assez fallacieuse car la production d'une éolienne dépendra de son site d'implantation.

2. Puissance surfacique et prix du kilowatt nominal. - La puissance surfacique d'une éolienne est le quotient de la puissance nominale par la surface rotorique. C'est un paramètre qui, pour une comparaison entre éoliennes, est intéressant puisqu'il tient compte à la fois de la vitesse du vent nominal et du rendement de l'éolienne.

Le graphique suivant montre les variations du prix du kilowatt nominal en fonction de la puissance surfacique.On observe une diminution très nette du prix lorsque la puissance surfacique augmente.

Les machines surdimensionnées auront des puissances surfaciques faibles et il est inévitable que le prix de l'énergie produite sera élevé.

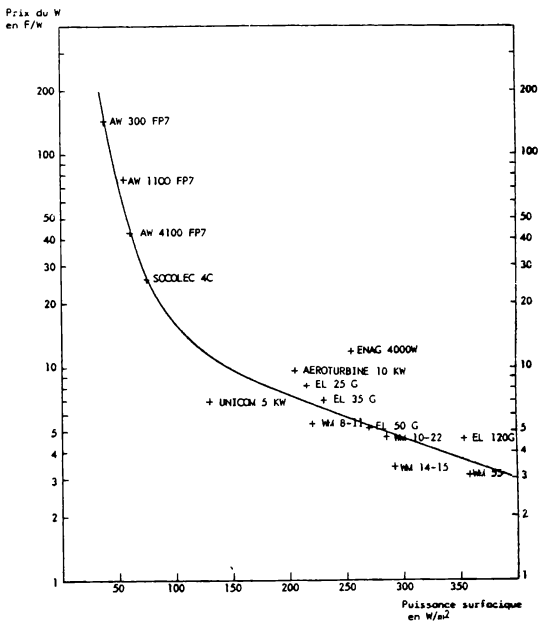
3. Production en série et prix du kilowatt-heure. - Dans l'étude de L.V. DIVONE (1980), une estimation de l'évolution des prix du kWh électrique éolien aux Etats-Unis a été calculée en fonction de la puissance des aérogénérateurs et du nombre d'unités produites.

Le graphique ci-joint montre la fourchette des prix du kWh en fonction de la vitesse moyenne du vent. Pour de petites séries, on constate que l'influence du site est prépondérante et que la fourchette d'estimation se resserre lorsque le nombre d'unités produites augmente.

Pour des éoliennes de puissance moyenne (40 kW nominal) on obtient des prix du kWh électrique compris entre 0,25 franc et 0,40 franc pour des séries de 1000 unités placées sur des sites dont la vitesse moyenne du vent est comprise entre 6,3 et 5,4 m/s.

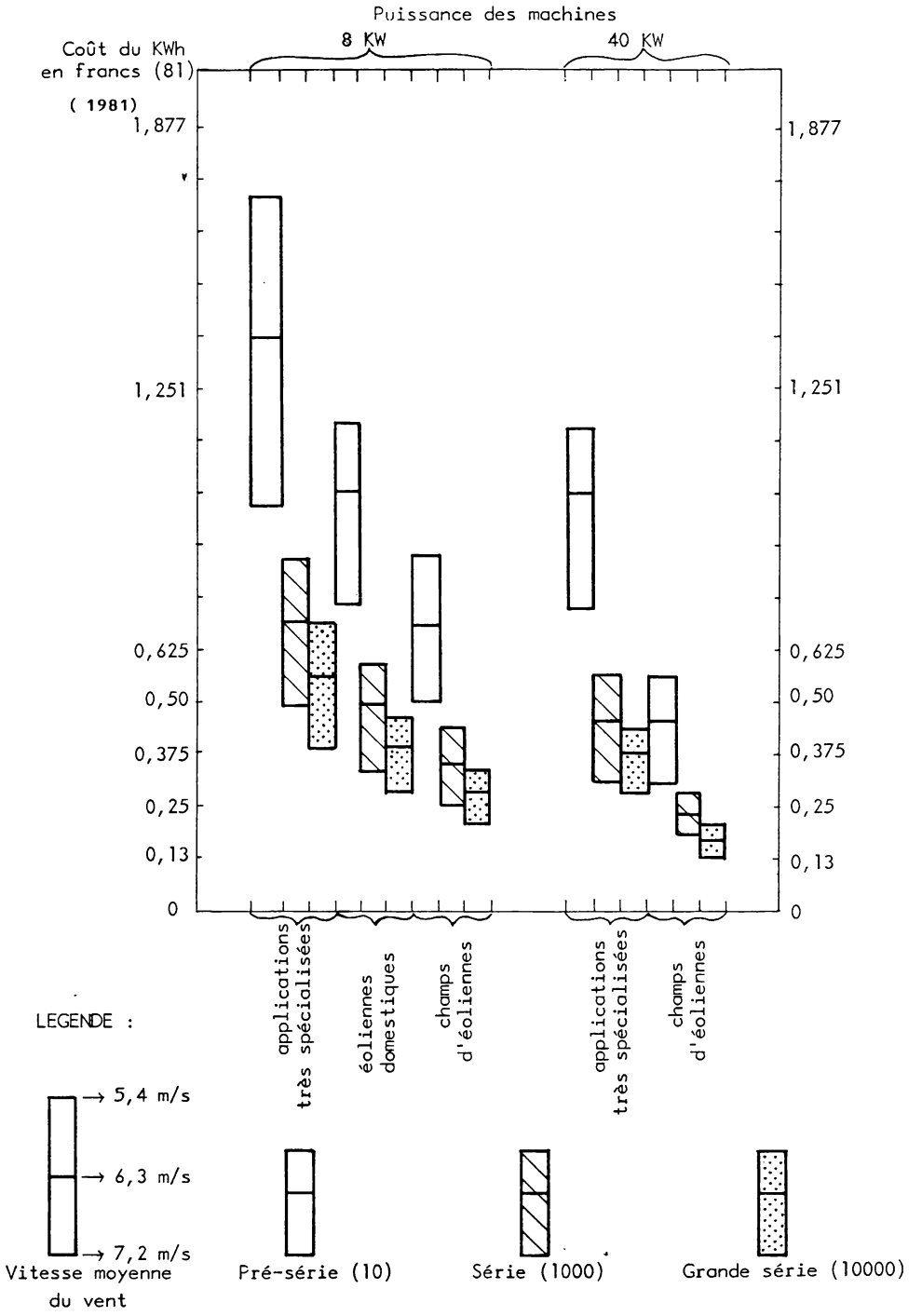
Prix du watt nominal en fonction de la puissance surfacique

AW : Aérowatt (France)
EL : Elektro (Suisse)
WM : Wind-Matic (Danemark)
UNICUM : France
ENAG : France
AEROTURBINE : France



Prix estimés du kWh éolien aux Etats-Unis

en fonction de la puissance et du nombre d'unités produites



CHAPITRE III

Mesure et calcul de l'énergie éolienne

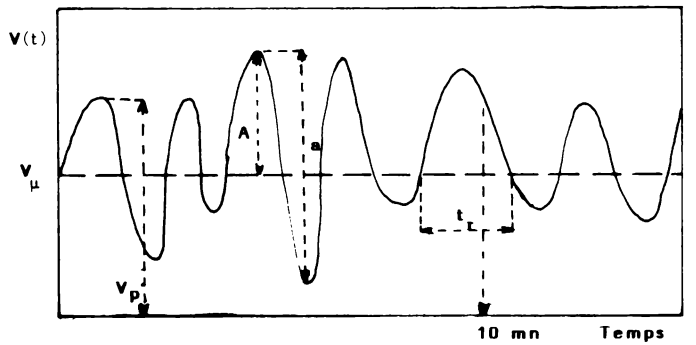
I. - LA MESURE DU VENT

1. Définitions. - Le vent est un phénomène de déplacement d'air dont la vitesse et la direction peuvent être représentées par un vecteur **V**, fonction du temps, en chaque point de l'espace. Par suite des variations continuelles de la vitesse et de la direction de **V**, on mesure sa valeur moyenne $\mathbf{V}_\mu$ sur des intervalles réguliers de temps. L'intervalle retenu par la Météorologie Nationale, pour mesurer la vitesse moyenne du vent, est de dix minutes, suivant en cela les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie.

Le vecteur vent moyen $\mathbf{V}_\mu$ est généralement représenté par ses trois composantes cartésiennes (u,v,w) rapportées à un trièdre de référence dont les axes sont orientés respectivement vers l'est, le nord et le zénith. Les variations **V'** du vecteur **V**, autour de sa valeur moyenne $\mathbf{V}_\mu$, sont des vecteurs tels que :

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}_\mu + \mathbf{V}'(t)$$

La composante horizontale du vent moyen $\mathbf{V}_\mu$ est mesurée généralement par des anémomètres à moulinet et des girouettes. On peut également mesurer directement les composantes de $\mathbf{V}_\mu$ en utilisant un anémomètre à trois hélices.



Fluctuations de la vitesse du vent en fonction du temps

V_p : vitesse de pointe d'une rafale ; **A** : amplitude d'une rafale ; **a** : ampleur ; t_r : durée d'une rafale.

2. Anémomètres à coupelles. - Le procédé le plus simple pour mesurer la composante horizontale du vent moyen est l'utilisation d'anémomètres à coupelles.

Ces anémomètres comportent généralement 3 ou 4 coupelles, en métal ou en plastique.Les anémomètres à moulinet, qu'ils soient à coupelles ou à hélices, présentent tous un phénomène de survitesse dû à une réaction plus rapide lorsque le vent croît que lorsqu'il s'affaiblit. Cet effet est de l'ordre de 1 à 3% suivant les caractéritiques du vent et de l'anémomètre, ce qui entraîne une surestimation de la puissance éolienne de l'ordre de 3 à 9%.Un bourrelet situé autour de l'ouverture de la coupelle permet de réduire ce phénomène de survitesse.

L'anémomètre à trois coupelles en plastique semble s'imposer et la Météorologie Nationale l'utilise depuis 1968 en remplacement du modèle à quatre coupelles métalliques dont la réponse aux fluctuations du vent est moins performante que celui à trois coupelles.

La rotation des coupelles est due au fait que le vent exerce une force d'intensité supérieure lorsqu'il souffle sur la partie concave de la demi-sphère que sur sa partie convexe.Le moment des forces agissant sur chaque coupelle engendre une rotation du moulinet avec une vitesse angulaire proportionnelle à la vitesse du vent. Un transducteur assure alors la conversion de la vitesse de rotation du moulinet en un signal exploitable pour la mesure.

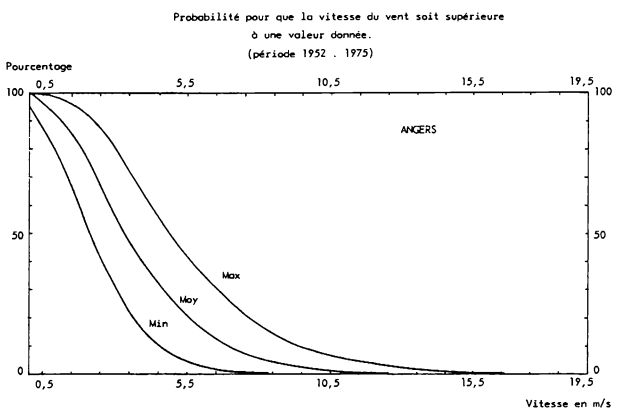
La technique la plus simple pour mesurer la vitesse moyenne consiste à totaliser le nombre de tours effectués par le moulinet durant un temps donné, à l'aide d'un compte-tour mécanique ou d'un compteur d'un autre type.Si l'on veut enregistrer les valeurs mesurées, divers systèmes électroniques permettent d'effectuer la moyenne des vitesses sur un temps donné et l'appareil délivre un signal de sortie électrique sous forme analogique ou digitale.

3. Anémomètres totalisateurs de vent passé. - Un anémomètre totalisateur mesure par lecture directe la quantité de vent passé.Un modèle commercialisé par Chauvin-Arnoux est, par exemple, constitué par un moulinet accouplé à un compteur numérique mécanique qui affiche directement les hectomètres de vent passé. De plus, un générateur d'impulsions à lames souples, est excité, tous les hectomètres de vent passé, par un aimant entraîné par l'arbre porte moulinet.A chaque excitation, le contact se ferme, fournissant une impulsion électrique. Ces impulsions peuvent être exploitées par un enregistreur analogique de vent moyen qui les intègre sur une période donnée.

Un anémomètre totalisateur, particulièrement bon marché, a été mis au point par Pierre LE CHAPELLIER et commercialisé très récemment. La sonde anémométrique comporte un moulinet à trois coupelles en plastique, de type météorologique, qui, grâce à un transducteur, délivre une impulsion électrique par tour du moulinet. Un compteur totalisateur à affichage numérique est connecté à la sonde anémométri-

que. Ce compteur est constitué par une petite calculatrice qui additionne les impulsions envoyées par l'anémomètre et permet de lire le nombre de mètres de vent passé. De plus, une mesure analogique de la vitesse instantanée du vent peut être effectuée à l'aide d'un millivoltmètre incorporé.L'ensemble est autonome et alimenté par une batterie cadmium-nickel de 8,4 V. Un autre ensemble de mesures anémométriques à imprimante peut également être connecté à la sonde.Ces compteurs d'impulsion peuvent également être utilisés comme solarimètre avec une sonde solaire formant un pyranomètre digital.

4. Girouettes. - La mesure de la direction du vent moyen est réalisée à l'aide de girouettes généralement à 18 directions de 20°. Le transducteur associé aux girouettes est un convertisseur d'angle qui peut être constitué par une résistance variable par bonds, un circuit à capacité ou inductance variable ,etc. Le choix du transducteur dépendra en grande partie de la technique d'enregistrement.



Vitesse m/s	8766 Moy	8784 Max	8760 Min
0	99,8	100	95,3
0,5	96,2	99,6	86,3
1,5	86,1	96,8	67,4
2,5	66,7	87,4	22,6
3,5	47,5	72,2	22,2
4,5	32,9	56,9	11,1
5,5	20,9	41,9	4,4
6,5	13,2	31,9	1,5
7,5	7,9	81,6	0,3
8,5	4,4	14,5	0,03
9,5	2,6	10,4	
10,5	1,3	6,55	
11,5	0,8	4,3	
12,5	0,4	2,8	
13,5	0,2	1,8	
14,5	0,13	1,2	
15,5	0,09	0,9	
16,5	0,04	0,5	
17,5	0,02	0,3	
18,5	0,01	0,2	
19,5	0,01	0,17	

II. - LES DONNEES METEOROLOGIQUES.

1. Données statistiques. - La mesure des vitesses et des directions du vent est réalisée quotidiennement par les services de la Météorologie Nationale . Les mesures des vitesses ont été rassemblées sous forme de divers tableaux disponibles à la Direction de la Météorologie à Paris. Les résultats statistiques portent sur la période 1951-1975 ou 1962-1975 (voir à propos du choix des périodes, les remarques faites au chapitre II). Les données utilisables pour le calcul de l'énergie éolienne sont les suivantes, pourchaque station de mesures :

-Nombre moyen, maximum et minimum d'heures où la vitesse du vent a été supérieure ou égale aux seuils indiqués. Ces tableaux sont établis mois par mois et comportent une totalisation annuelle.

Exemple de données météorologiques

fournies par les services de la Météorologie Nationale

"Nombre moyen, maximum et minimum d'heures où la vitesse du vent a été supérieure ou égale aux seuils indiqués"

LATITUDE 47.56 NORD
LONGITUDE .12 EST
ALTITUDE 59.00 METRES

STATION LEMANS PERIODE 1951/1975

NOMBRE MOYEN, MAXIMUM ET MINIMUM D HEURES OU LA VITESSE DU VENT
A ETE SUPERIEURE OU EGALE AUX SEUILS INDIQUES

SEUILS	JANVIER			FEVRIER			MARS			AVRIL			MAI			JUIN		
	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN
0	744	744	744	670	696	480	744	744	741	719	720	684	741	744	705	720	720	720
1	644	732	549	583	672	414	659	741	471	636	717	513	646	726	570	627	717	543
2	560	672	471	513	633	351	588	708	387	568	687	395	568	666	450	534	657	402
3	475	574	318	407	570	210	467	609	261	464	654	276	446	576	306	397	561	258
4	302	411	183	302	459	120	338	468	162	357	588	156	312	465	162	260	444	114
5	202	306	96	213	357	78	239	363	75	259	486	81	201	324	66	153	276	51
6	125	183	36	136	264	51	148	279	18	162	348	42	115	219	21	78	156	6
7	73	123	18	79	171	21	84	210	6	90	213	6	53	135	3	33	66	0
8	40	81	9	40	93	0	45	168	0	44	138	3	23	78	0	14	33	0
9	20	48	3	18	57	0	21	105	0	18	66	0	9	45	0	4	24	0
10	9	24	0	9	48	0	10	87	0	8	36	0	4	24	0	2	12	0
11	3	12	0	4	36	0	3	27	0	3	24	0	0	6	0	1	6	0
12	1	6	0	2	27	0	2	21	0	1	12	0	0	6	0	1	6	0
13	0	3	0	1	15	0	1	21	0	1	9	0	0	6	0	0	6	0
14	0	3	0	0	6	0	1	18	0	0	9	0	0	3	0	0	6	0
15	0	0	0	0	6	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0
16	0	0	0	0	6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
17	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

-Fréquences moyennes, pour 1000, des vitesses de vent en fonction des directions (rose de 18 directions).

-Fréquences moyennes, pour 1000, des vitesses maximales qutidiennes égales ou supérieures aux seuils indiqués en ordonnée.

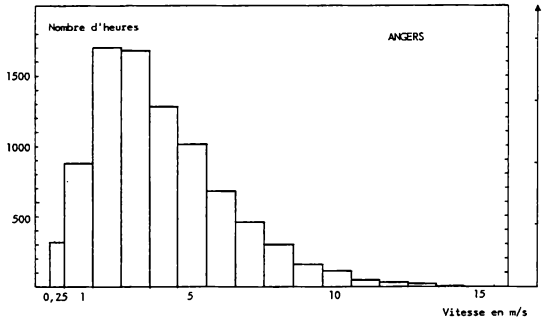
En général, les mesures ont été réalisées à 10 m au-dessus du sol mais certaines stations ont des anémomètres placés à des hauteurs différentes. Pour la station de l'île d'Yeu, par exemple, les mesures sur la période indiquée sont faites à 22,6 m.

2. Courbes de répartition des vitesses. - Ces données météorologiques expriment la probabilité, que l'on peut exprimer en pourcentage, pour que la vitesse du vent soit supérieure à une valeur donnée. Ces valeurs, reportées sur les graphiques suivants, montrent que des écarts importants par rapport à la vitesse moyenne, sont observables d'une année à l'autre.

Il faut remarquer que dans les tableaux de la Météorologie, les vitesses de vent ont été arrondies à l'unité la plus voisine.Ainsi la valeur notée 1 m/s correspond à l'ensemble d es vitesses moyennes du vent comprises dans l'intervalle de vitesses 0,5 m/s à 1,5 m/s.

En effectuant la différence entre le nombre d'heures durant lequel la vitesse du vent a été respectivement supérieure à (k-0,5) m/s et à (k+0,5) m/s, on obtient le nombre d'heures durant lequel le vent a précisément soufflé dans l'intervalle de vitesses (k-0,5) et (k+0,5) m/s. En d'autres termes, ce nombre d'heures est proportionnel à la probabilité pour que le vent souffle dans cet intervalle de vitesses.

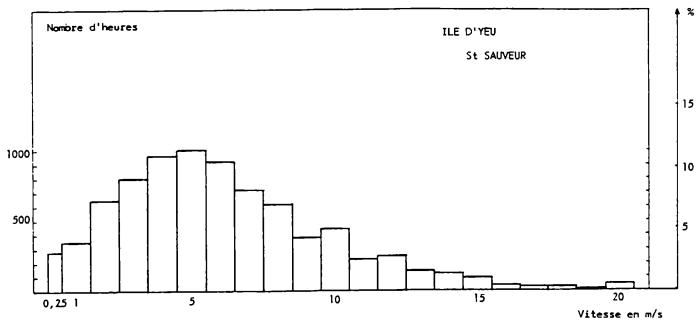
Un histogramme de la distribution des vitesses moyennes peut donc être établi pour chaque station en portant en abscisses les vitesses du vent et en ordonnées le nombre d'heures durant lequel le vent à soufflé dans chaque intervalle de vitesses [k-0,5; k+0,5] m/s.



Vitesse m/s	Nombre d'heures
0	19
0,25	320
1	878
2	1702
3	1680
4	1280
5	1052
6	680
7	464
8	303
9	158
10	111
11	43
12	31
13	21
14	7
15	4
16	4
17	2
18	1
19	0
20	1

Distribution des vitesses moyennes du vent

(période : 1952- 1975)



Vitesse m/s	Nombre d'heures
0	553
0,25	289
1	347
2	655
3	805
4	974
5	1007
6	927
7	721
8	623
9	395
10	446
11	233
12	250
13	144
14	132
15	96
16	47
17	29
18	31
19	13
20	48

Distribution des vitesses moyennes de vent (période 1951-1975)

3. Fonction de distribution des vitesses de Weibull. - L'histogramme des distributions de vitesses peut être "lissé" à l'aide d'une fonction analytique qui représente au mieux les valeurs expérimentales. Diverses formules mathématiques ont été proposées mais la loi de distribution de Weibull est la plus couramment utilisée.Elle fournit une méthode empirique pour avoir une bonne représentation de la distribution du vent plus maniable que les autres représentations.

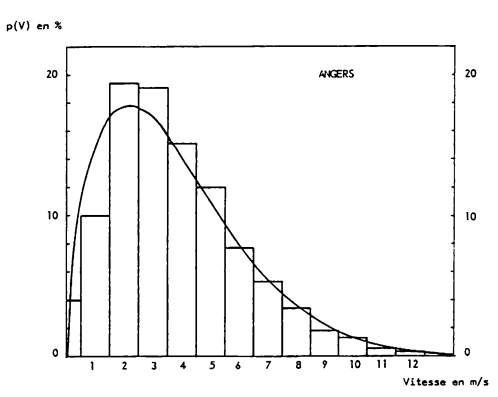
La fonction de distribution de Weibull est donnée par :

$$p(V) = (k/c)\,[V/c]^{k-1} \exp\,[\,-\,(V/c)^{k}]$$

où p(V) est la probabilité pour que le vent souffle à la vitesse V; c est appelé le "facteur d'échelle" et a les dimensions d'une vitesse; k est le "facteur de forme", sans dimension, et caractérise la dissymétrie de la distribution. Diverses méthodes permettent de calculer les paramètres k et c (voir C.G. JUSTUS - 1980).

La vitesse moyenne du vent V_m est le moment du premier ordre de la fonction de distribution :

$$V_m = \int_0^{\infty} V\, p(V)\, dV$$



Vitesse m/s	p(V) %
0,5	11,3
1,5	17,1
2,5	17,6
3,5	15,5
4,5	12,4
5,5	9,2
6,5	6,5
7,5	4,3
8,9	2,8
9,5	1,7
10,5	1
11,5	0,58
12,5	0,32
13,5	0,17
14,5	0,09
15,5	0,045

Fonction de distribution des vitesses de Weibull comparée à l'histogramme des valeurs mesurées

III. - ENERGIE EOLIENNE MOYENNE ANNUELLE.

1. Puissance d'un flux d'air. - L'énergie cinétique d'une masse m d'air, animée d'une vitesse V, est donnée par :

$$W = 0{,}5\ m\ V^2$$

Si cette masse d'air passe, en une seconde, à travers une surface unité, son volume sera égal à V. Soit d la densité de l'air, cette masse est alors égale à : m = d V. Par suite, le flux d'énergie par seconde ou puissance, passant à travers une surface unité et transporté par un vent de vitesse V, s'écrit :

$$W = 0{,}5\ d\ V^3$$

Lorsque d est exprimée en kg/m³ et V en m/s, la puissance W est en watt par mètre carré (W/m²). La valeur utilisée pour la densité de l'air est :

$$d = 1{,}225\ kg/m^3$$

2. Histogramme de l'énergie éolienne moyenne annuelle. -Durant un temps dt où la puissance du vent est W, le travail susceptible d'être fourni par le vent est : dE = W dt. C'est l'énergie éolienne durant le temps dt.

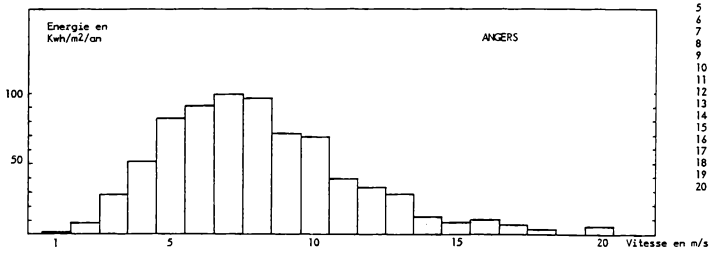
Les histogrammes de distribution des vitesses donnent le temps annuel t_i où le vent a soufflé à la vitesse V_i , ou plus précisément dans l'intervalle de vitesses [V_i -0,5; V_i +0,5] m/s. Pour chaque valeur V_i , l'énergie éolienne correspondante est:

$$E_i = 0{,}5\ d\ V_i^3\ t_i$$

Si le temps t_i est exprimé en heures; la puissance en watts par mètre carré; l'énergie E_i annuelle du vent passant à travers une surface de 1 m², est mesurée en Wh/m².an.

L'histogramme de l'énergie éolienne est obtenu en portant en ordonnées les énergies calculées E_i et en abscisses les valeurs correspondantes V_i des vitesses. Les statistiques météorologiques étant calculées à partir des vitesses moyennes mesurées sur des périodes de 10 mn, il en résulte une certaine approximation sur la valeur de l'énergie éolienne donnée par la formule précédente. (voir au chapitre II pour la correction à apporter tenant compte de la turbulence).

Répartition par vitesse de l'énergie éolienne annuelle moyenne à ANGERS - période 1952 -1975 -



Vitesse en m/s	Energie Wh/m²/an
0	0
0,25	3
1	548
2	8510
3	28350
4	51200
5	82190
6	91800
7	99470
8	96960
9	71990
10	69375
11	39930
12	33480
13	28830
14	12000
15	8440
16	10240
17	6140
18	3840
19	0
20	5000

L'histogramme donnant l'énergie éolienne pour chacun des intervalles de vitesses du vent, l'énergie éolienne moyenne annuelle totale, pour toutes les vitesses, s'obtient en additionnant l'ensemble des valeurs E_i précédentes,soit :

$$E\,(Wh/m^2.an) = \sum_i 0{,}5\ d\ V_i^3\ t_i = \sum_i E_i$$

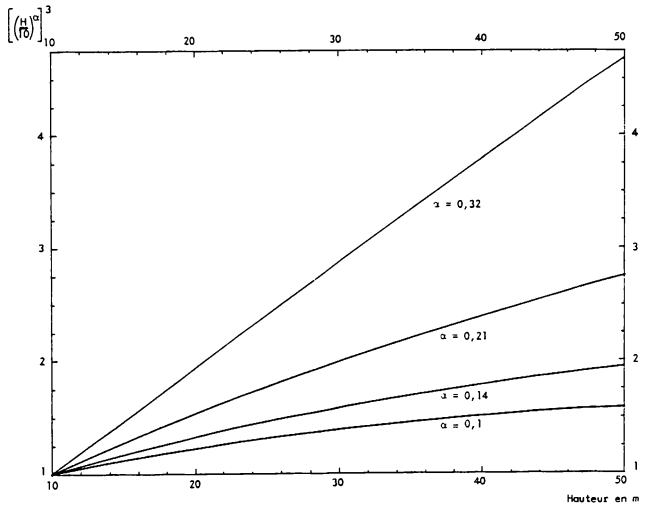
IV. - INFLUENCE DE LA HAUTEUR ET DES SITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE.

1. Profil des vitesses en fonction de la hauteur. - La variation de la vitesse moyenne du vent, calculée sur une courte période, en fonction de la hauteur, est donnée par diverses théories. Plu simplement, le profil vertical des vitesses de vent sur une longue période peut s'exprimer empiriquement par la relation :

$$V(H) = V(10)\ [\ H/10\ ]^{A}$$

où V(H) représente la vitesse à la hauteur H; V(10) la vitesse à 10 m au-dessus du sol; A est un coefficient dit de rugosité qui dépend de la nature des obstacles situés au sol.

Ce coefficient A est compris entre 0,08 et 0,40, sa valeur augmentant en fonction de la grandeur et de la densité surfacique des obstacles au sol. Selon la direction considérée, A peut évidemment avoir des valeur différentes pour un site donné.L'utilisation de cette formule nécessite donc une bonne connaissance du site.



H \ α	0,1	0,14	0,21	0,32
10	1	1	1	1
20	1,23	1,338	1,547	1,945
30	1,39	1,586	1,99	2,87
40	1,515	1,79	1,294	3,784
50	1,62	1,96	2,756	4,688

Variations relatives de l'énergie éolienne en fonction de la hauteur au-dessus du sol - Influence du coefficient de rugosité selon les sites-

Une approche intéressante de l'estimation de la fonction de distribution des vitesses de Weibull, selon la hauteur au-dessus du sol, est donnée par C.G. JUSTUS et A.S. MIKHAIL (1976). Dans cette simulation, les paramètres c et k de Weibull, ayant les valeurs c_a et k_a au niveau a de l'anémomètre sont transformés en c_H et et k_H au niveau H par les relations :

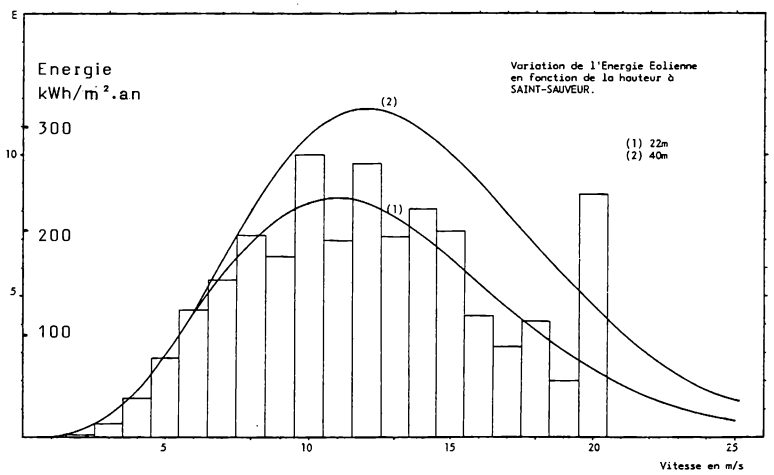
$$k(H) = \frac{k_a [\, 1 - 0{,}088 \, \mathrm{Ln} \, (H_a / 10) \,]}{1 - 0{,}088 \, \mathrm{Ln} \, (H / 10)}$$

$$c(H) = c_a \, [H / H_a]^b$$

où le coefficient b est donné par l'expression :

$$b = \frac{0{,}37 - 0{,}088 \, \mathrm{Ln} \, c_a}{1 - 0{,}088 \, \mathrm{Ln} \, (H_a / 10)}$$

Le coefficient c est exprimé en m/s et les hauteurs H en mètres.



Variation de l'énergie éolienne en fonction de la hauteur au-dessus du sol - Calcul à partir de la variation de la fonction de distribution des vitesses de Weibull selon la méthode de JUSTUS et MIKHAIL

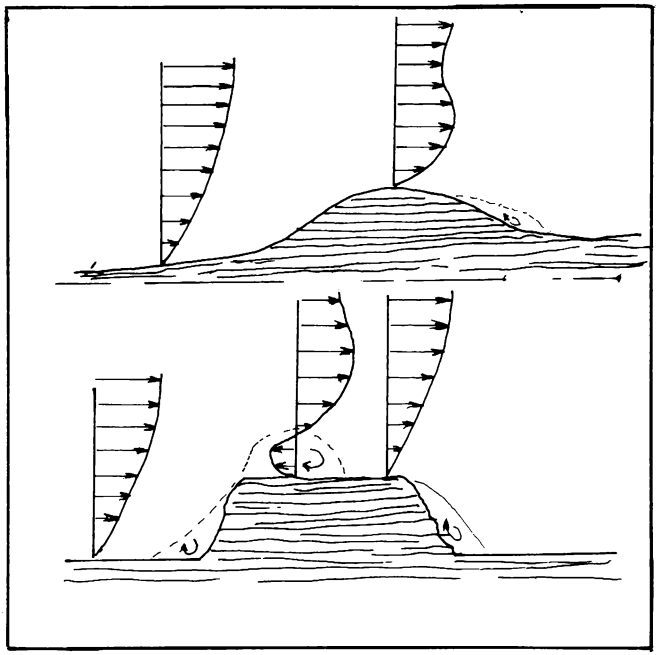
2. Influence du relief. - Les considérations précédentes, relatives à l'influence de la rugosité sur le profil vertical des vitesses du vent, ne sont valables que pour des zones plates et homogènes possèdant une rugosité moyennement constante.

Par contre, les obstacles topographiques importants, tels que collines, falaises, etc, vont engendrer des phénomènes différents sur la répartition verticale des vitesses de vent. De nombreuses études ont été consacrées à ce sujet et des modèles mathématiques ont été élaborés pour la représentation de ces phénomènes.

De manière générale, les collines de formes arrondies permettent d'obtenir un effet d'accélération du vent au sommet de la colline. Cet effet d'accélération, par rapport au gradient vertical en terrain plat, ne se fait évidemment sentir que

jusqu'à une certaine hauteur qui dépendra de nombreux paramètres : pente, forme, rugosité,etc.

Les effets d'accélération semblent plus intéressants pour des lignes de crêtes arrondies, formant une sorte de barrage accélérateur, que pour des collines isolées. Pour ces dernières, le vent à tendance à contourner la colline plutôt qu'à passer par-dessus, dans des conditions de stabilité importante. Les sites les plus intéressants pour l'implantation des éoliennes sont donc tout d'abord les crêtes perpendiculaires à la direction principale du vent. Des terrains avoisinants dégagés, ou de faible rugosité, constituent un avantage supplémentaire.Puis les collines à pente douce dont les sommets ne sont pas trop plats et ne comportent pas de discontinuité importante de pente. D'autre part, pour tous les sites, les éoliennes doivent être éloignées d'une distance importante des obstacles élevés tels que bâtiments, arbres, haies,etc.

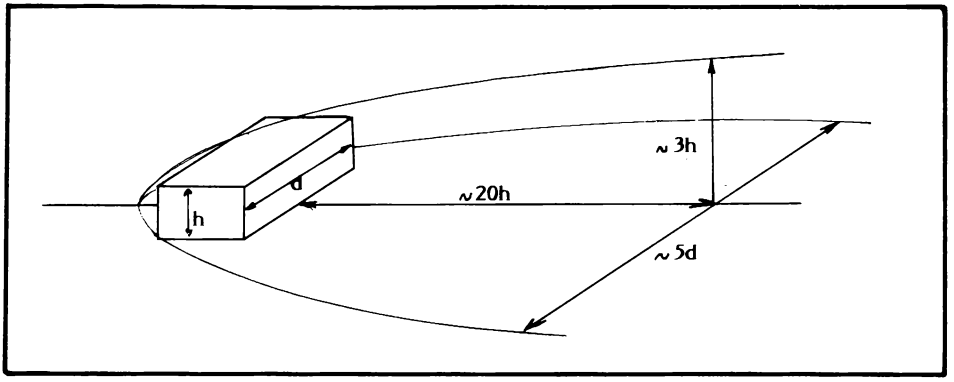


Phénomènes d'augmentation de la vitesse du vent au-dessus des collines

Les flancs abrupts provoquent des zones turbulentes; les pentes douces engendrent une accélération du vent au sommet.

3. Influence des obstacles isolés. - Lorsqu'un obstacle isolé se dresse sur un site dégagé, l'écoulement du vent est très fortement perturbé dans le sens de l'écoulement du vent et autour du bâtiment. Si h est la hauteur du bâtiment et d

la dimension de la façade latérale, perdiculairement à la direction du vent, l'écoulement engendre une zone de sillage dont l'extension dans le sens de l'écoulement est de l'ordre de 20 h, latéralement d'environ 4 à 5 d (pour une distance à l'obstacle de 20 h) et verticalement de 2 à 3 h. (SACRE C. -1982-).



Sillage derrière un bâtiment isolé (SACRE C. -1982-)

Lorsque la direction du vent n'est plus normale à la façade du bâtiment, l'écoulement devient plus tourbillonnaire mais l'ordre de grandeur de la zone perturbée reste identique.

La présence d'une haie, au vent d'un site, entraîne également une diminution de la vitesse moyenne mais une partie du vent traverse la haie et, par suite, la perte de vitesse du vent sera d'autant plus faible que la haie sera perméable. Une haie perméable engendrera des tourbillons moins importants qu'un mur de mêmes dimensions. Or ce sont les gros tourbillons qui provoquent la disparition du sillage en s'éloignant de l'obstacle, aussi la distance de perturbation dans le cas d'une haie perméable sera-t-elle plus importante que pour un mur.

CHAPITRE IV
Gisement éolien en France

par **Philippe DUCHENE-MARULLAZ**
Chef de la Division Climatologie
C.S.T.B. - NANTES -

I. - VARIATIONS DU VENT A L'ECHELLE DE LA FRANCE

En raison des dimensions de la France, de la présence de massifs montagneux importants et de grandes étendues d'eau (Océan Atlantique et Mer Méditerranée), le vent va varier de façon marquée à l'échelle du territoire (pour une même hauteur au-dessus du sol et un même environnement).

Une illustration de cette variation est présentée ici sous forme de cartes obtenues après un traitement statistique approprié des données de vent relatives à l'ensemble du territoire.

1. Les données de base. - En France, les données de base sur la vitesse du vent sont fournies par la Météorologie qui mesure régulièrement la vitesse instantanée et la direction du vent depuis 1949 dans un grand nombre de stations, plus de cent, réparties sur l'ensemble du territoire.

La vitesse moyenne du vent sur 10 mn est déterminée toutes les trois heures (de 00 h TU à 21 h TU) ainsi que la direction moyenne correspondante. Les valeurs, pour l'ensemble de la France, sont stockées sur un support magnétique au Service Climatologique de la Météorologie à Paris.

La représentativité et la précision des résultats du traitement statistique va dépendre en grande partie de la qualité des données de vent initiales. Celle-ci est liée aux points suivants :

-durée d'enregistrement;
-caractéristiques des appareils de mesure (capteur et enregistreur);
-caractéristiques de l'environnement proche : effets de sillage (bâtiments, arbres, haies);
-complexité du site environnant (zone montagneuse, zone de collines, falaises abruptes, nombreuses natures de sol différentes);
-modification au cours de la période d'enregistrement du type de capteur, de la hauteur des capteurs, de l'emplacement du pylône anémométrique, des caractéristiques de l'environnement proche.

Une exploitation statistique significative nécessite une durée d'enregistrement de l'ordre de 10 ans; elle ne peut être prise inférieure à 5 ans, sous peine d'introduire un biais systématique, la variation interannuelle du vent pouvant être importante.

En France, dans la plupart des stations météorologiques, le capteur anémométrique type Papillon à 4 coupelles en métal a été remplacé par un modèle plus performant à 3 coupelles en plastique vers les années 68-69.Malgré les comparaisons d'appareils effectuées par la Météorologie qui ont montré une concordance acceptable entre les vitesses moyennes des deux appareils (il n'en est pas de même pour la réponse aux fluctuations), il est préférable, dans la mesure du possible, d'utiliser des données soit de la période antérieure à 1968 soit de la période postérieure.

Compte tenu de l'amélioration des systèmes de mesure (capteurs, enregistreurs) et de la prise en compte de plus en plus fréquente de l'importance des effets de sillage qui se traduit par un éloignement du pylône anémométrique de tout obstacle il est fortement conseillé de choisir les 10 dernières années d'enregistrement et d'éviter d'utiliser des séries trops anciennes. Il vaut mieux, dans la plupart des cas, utiliser des séries de 5 ou 6 années très récentes plutôt que des séries de 15-20 ans très anciennes.Ceci n'est évidemment pas possible lorsque l'on s'intéressea aux valeurs extrêmes qui nécessitent de longues séries d'enregistrement.

2. Le site standard. - Afin de pouvoir comparer les vitesses de vent en tout point du territoire et de tracer les lignes d'iso-vitesses entre les résultats obtenus dans les différentes stations, il est indispensable de ramener les données à un site standard.Les caractéristiques de ce site sont :

-site plat et dégagé (rase campagne) sur plusieurs kilomètres autour du point considéré dans toutes les directions (rugosité correspondant à Z_o = 0,07 m)

-aucun obstacle proche pouvant créer un effet de sillage;

-hauteur de référence : 10 m.

Il est ainsi nécessaire de corriger les données météorologiques qui dans la plupart des cas sont perturbées par un ou plusieurs des facteurs énumérés plus haut.

Cette correction nécessite l'examen de l'environnement proche (visite à la station, examen d'un plan de masse) et de l'environnement lointain (carte IGN au 1/25 000 ou photos aériennes) et l'utilisation d'un modèle de type de celui proposé par C. SACRE (1982), en supposant que l'atmosphère se trouve en stabilité neutre (ce qui est vrai dans le cas de vitesses de vent élevées).

Remarques. - En raison du caractère extrêmement variable du vent en zone montagneuse, les mesures effectuées dans les stations situées dans de telles zones n'ont qu'une représentativité extrêmement locale; il n'est pas possible dans ces conditions de comparer les valeurs entre elles et de pouvoir tracer des lignes d'iso-vitesse Dans ce qui suit, les zones d'altitude supérieure à 500 m sont assimilées à des zones montagneuses.

Il est important de noter également que la plupart des stations situées en bord de mer, sont installées près d'un phare ou d'un bâtiment surmonté d'un sémaphore qui induisent souvent un sillage important.De plus, beaucoup de ces stations sont situées sur une falaise très élevée et très abrupte qui perturbe fortement l'écoulement du vent et dont il est actuellement difficile de corriger l'effet sur les données. De plus, dans certaines cas, les mesures ne sont pas effectuées à certaines heures (la nuit en particulier), ce qui provoque un biais dans la distribution statistique des valeurs tri-horaires en raison de la variation diurne des vents. Il est prudent, dans la plupart des cas, d'utiliser les données de ces stations côtières avec beaucoup de précautions.

3. Le traitement statistique. - A partir des vitesses de vent corrigées des effets locaux, il est possible de déterminer les distributions de fréquences et de fréquences cumulées pour chaque station et pour la période considérée.Il est ainsi possible de calculer les distributions annuelles, mensuelles, et saisonnières; on peut aussi calculer dans ces trois cas, les distributions horaires et celles par direction ou groupe de directions.

Nous présentons sur les figures suivantes quelques exemples de la répartition géographique de la vitesse du vent (dans le cas des distributions annuelles).

La figure 2.2 est obtenue en utilisant la loi logarithmique de variation de la vitesse du vent avec la hauteur au-dessus du sol; cette figure peut pratiquement se déduire de la figure 2.1 en augmentant de 1 m/s la valeur des lignes d'iso-vitesse. Ces figures 2.1 et 2.2 montrent la nécessité de se placer le plus haut possible pour récupérer le maximum d'énergie et ceci d'autant plus que la région considére est moins ventée.

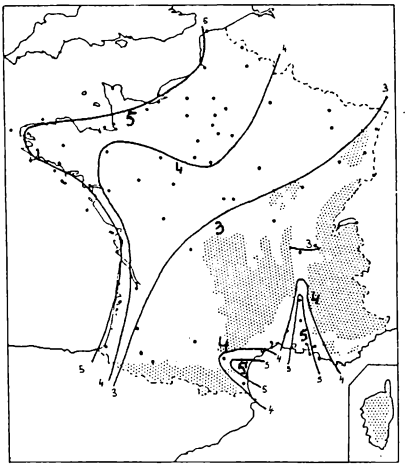


Fig.2.1. Vitesse moyenne annuelle à 10 m.

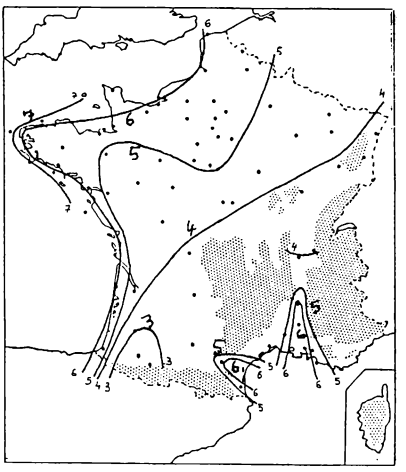
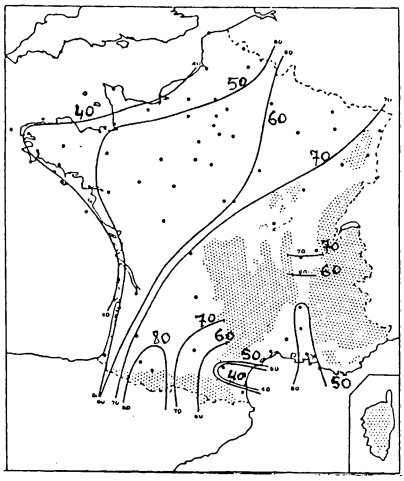


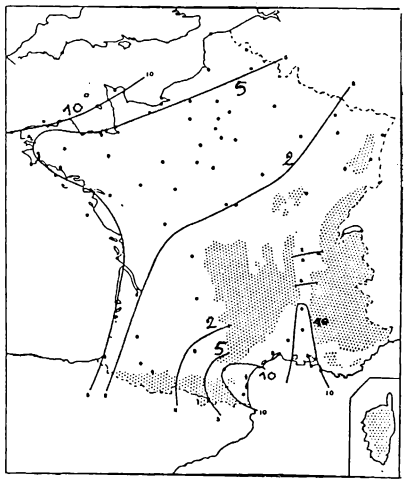
Fig.2.2. Vitesse moyenne annuelle à 30m

La figure 2.3 indique le pourcentage annuel de temps où la vitesse est inférieure à 4 m/s; cette valeur correspond souvent au seuil de production des éoliennes On voit ainsi que dans les régions les plus favorables, à 10 m, les éoliennes ne produisent aucune énergie entre 30 et 50 % du temps, et dans les régions les plus défavorables de 70 à 80 % du temps.

La figure 2.4 indique le pourcentage annuel de temps où la vitesse est supérieure à 10 m/s (valeur correspondant à une vitesse nominale très fréquente). Pour les zones les plus favorables, le temps de fonctionnement à la vitesse nominale varie entre 5 et 15 % (toujours à 10 m), c'est-à-dire 438 h à 1314 h par an.



Fréquence des vitesses $\bar{V} \leqslant 4$m/s Fig.2.3
(pourcentage)



Fréquence des vitesses $\bar{V} \geqslant 10$m/s. Fig.2.4.
(pourcentage)

4. La modélisation. - Les distributions de fréquences de la vitesse moyenne du vent peuvent être modélisées en utilisant la distribution de Weibull qui constitue une bonne représentation de ces distributions expérimentales.

La distribution de Weibull utilisée ici est une fonction à deux paramètres. La fonction de densité de probabilité s'écrit :

$$p(V\mu) = [C/A\,][V\mu/A]^{C} \exp -[V\mu/A]^{C}$$

où $V\mu$ est la vitesse moyenne du vent; A, un paramètre d'échelle; C, un paramètre de forme.

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(V\mu) = 1 - \exp -[V\mu/A]^{C}$$

L'ajustement de la distribution de Weibull aux valeurs expérimentales qui permet de déterminer les paramètres A et C peut être effectué de différentes façons. Citons en particulier :

-la méthode des moments;

-la méthode des moindre carrés;

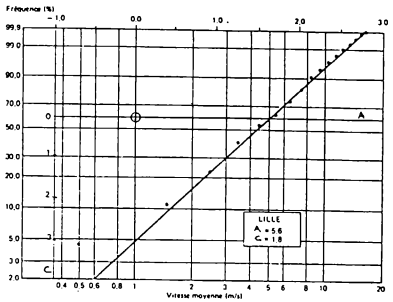


Fig.2.5.

Ajustement d'une distribution de Weibull

-l'utilisation d'un papier de Weibull gradué spécialement (en ordonnées Log [-Log (1-F(Vμ))] et en abscisse Log Vμ). Un exemple d'une telle détermination est fourni à la figure 2.5.

Le calcul des paramètres A et C, pour l'ensemble des stations, permet de tracer les lignes d'iso-valeur de ces paramètres (figures 2.6 et 2.7).

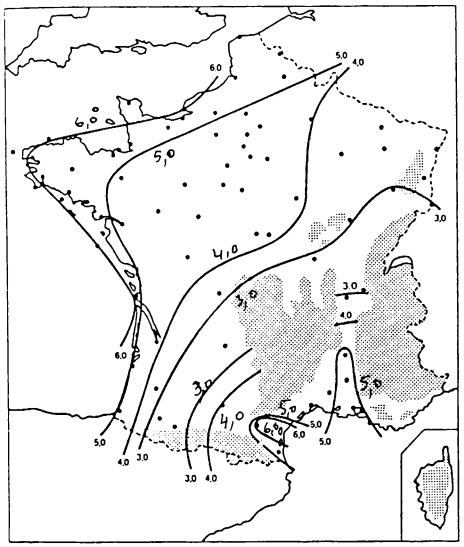


Fig.2.6. Paramètre d'échelle A

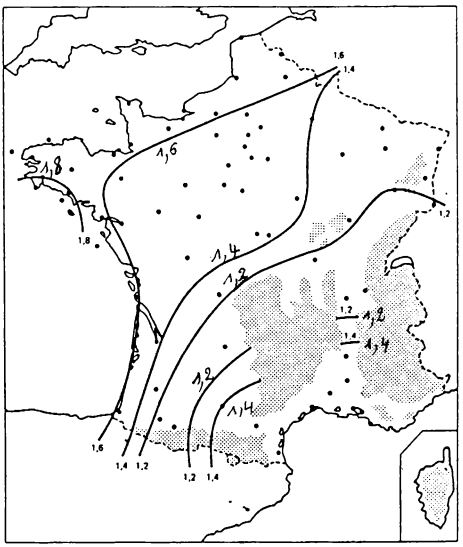


Fig. 2.7. Paramètre de forme C

A partir de ces cartes et de la fonction de répartition, il est alors possible de déterminer en tout point du territoire la distribution des vitesses moyennes du vent.Ceci est très intéressant, en particulier lorsqu'il n'y a pas de station météorologique dans la zone concernée.De plus, ces valeurs prenant en compte les corrections relatives aux valeurs des stations météorologiques, il n'y a pas à faire cette démarche lorsqu'on se trouve au voisinage d'une telle station.

On peut également, en tout point du territoire déterminer très facilement les fréquences de production d'énergie entre la vitesse de démarrage et la vitesse nominale et au-delà de la vitesse nominale, pour n'importe quel type d'éolienne.

5. Durée des séquences de vent. - En plus de la détermination des caractéristiques de la distribution de fréquence du vent, il est utile de connaître la probabilité d'occurence des séquences consécutives de vent correspondant à un seuil de vitesse de vent donné. Cela permet, en particulier, de déterminer la durée de non fonctionnement de l'éolienne correspondant à un seuil de probabilité donné et de dimensionner en conséquence le stockage ou l'appoint énergétique.

Un exemple est présenté à la figure 2.8 où est indiqué la fréquence des séquences consécutives de vitesses de vent inférieure à 4 m/s dont la durée est égale ou supérieure à un certain nombre d'heures (station de Perpignan). Sur cette figure, on voit aussi que la fréquence d'une séquence de vent de vitesse inférieure à 4 m/s durant 48 heures et plus est égale à 4%; ainsi un stockage de 48 h pourra couvrir la plupart des besoins en cas de non fonctionnement.

La variation géographique de ces phénomènes n'a pas encore été modélisée comme celle de la distribution de fréquences des vitesses moyennes de vent.

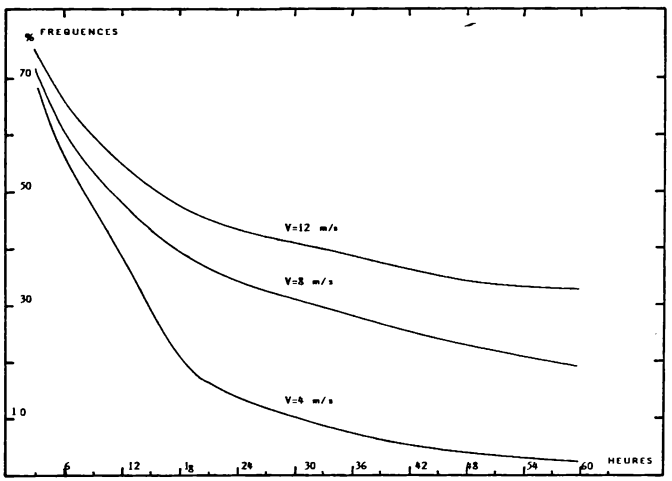


Fig. 2.8. Fréquence des séquences consécutives de vitesses de vent inférieures aux seuils indiqués.

(Documentation : Institut de Développement des Ressources Renouvelables)

II. - ENERGIE EOLIENNE DISPONIBLE EN FRANCE.

A partir des mesures de vent, il est possible de calculer l'énergie éolienne disponible et, comme pour le vent, de cartographier sa variation géographique à l'échelle de la France.

L'énergie éolienne disponible est l'énergie cinétique globale contenue dans le vent; c'est l'énergie que pourrait récupérer une éolienne idéale ayant un facteur de conversion C_p identique à 1 quelle que soit la vitesse du vent. Dans la pratique, le facteur de conversion est inférieure à 0,4 et varie avec la vitesse du vent.

1. Détermination de la puissance éolienne disponible. - Dans son déplacement à la vitesse **V**, l'air transporte de l'énergie sous forme d'énergie cinétique E_c:

$$E_c = 0{,}5\ d\ V^2$$

où d est ma masse volumique de l'air. La puissance à travers une surface unité est

$$P = 0{,}5\ d\ V^3$$

Si l'on veut calculer la puissance disponible pour un intervalle de temps important (mois, saison, année), il faudrait connaître les valeurs des vitesses instantanées relatives à cet intervalle; cela n'est pas réalisable.

Par contre, il est possible, en raison des propriétés statistiques de la vitesse instantanée du vent, de calculer la puissance moyenne pour un intervalle de 10 mn et ensuite, à l'aide de la distribution de fréquence des vitesses moyennes sur 10 mn de calculer la puissance moyenne pour un intervalle de temps T (années, saison, mois,etc).

La puissance moyenne sur 10 mn s'écrit :

$$P' = 0{,}5\ d\ (1/T)\int_0^T V^3\ dt$$

avec T = 10 mn. Or nous avons : $V = V\mu + V'$, où $V\mu$ est la vitesse moyenne du vent sur 10 mn et V' la fluctuation.On a alors, en appelant I l'intensité de la turbulence:

$$P' = 0{,}5\ d\ [1 + 3\ I^2]\ V\mu^3$$

La puissance moyenne sur un temps T s'écrit :

$$P = 0{,}5\ d\ [1 + 3\ I^2]\int_0^\infty p(V\mu)V\mu^3\ dV$$

où $p(V\mu)$ est la distribution de fréquence de la vitesse moyenne correspondant au temps T considéré (année, saison, mois).

2. Calculs pratiques -Cartographie de l'énergie éolienne annuelle. - L'expression précédente peut s'écrire :

$$P(W/m^2) = 0{,}686 \sum_i f_i\ V\mu_i^3$$

où f_i est la fréquence correspondant à la vitesse moyenne du vent $V\mu_i$. On a pris d = 1,225 kg/m³ (valeur relative à une température de 15°C et à l'altitude Z=0). I = 0,2, c'est la valeur de l'intensité de turbulence à 10 m en rase campagne. Comme pour l'étude de la variation géographique du vent, on se réfère à un site en rase campagne.

L'énergie éolienne annuelle, à 10 m en rase campagne, s'écrit :

$$E\ (kWh/m^2.an) = P\ [\ 24 \times 0{,}365\ ]$$

soit :

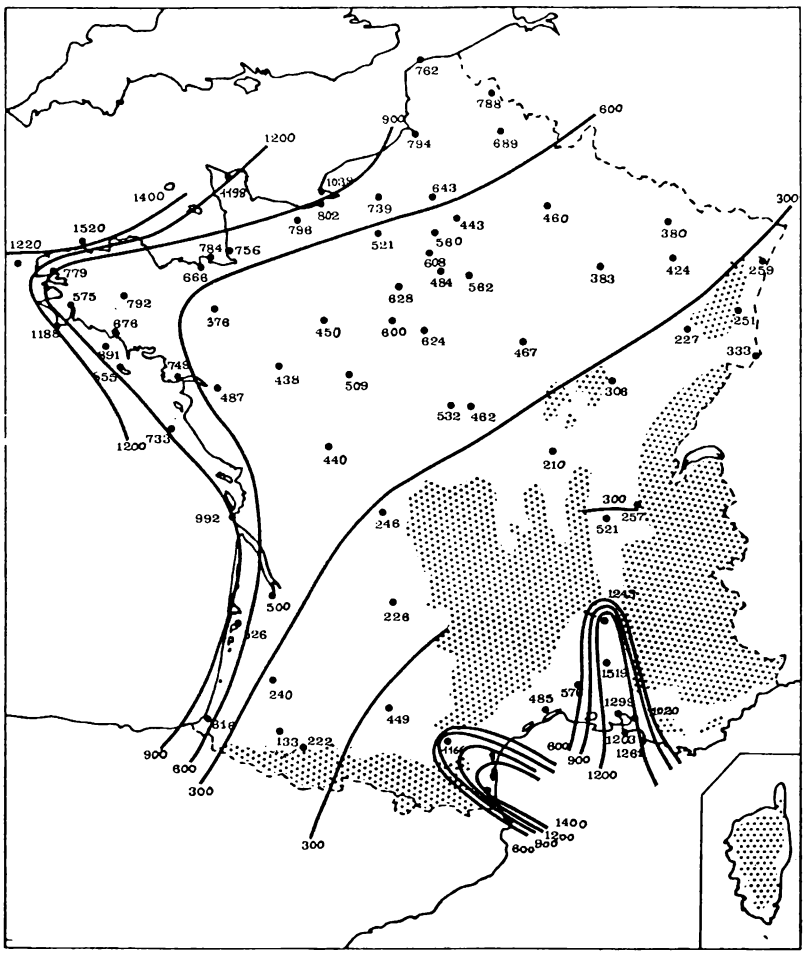
$$E\ (kWh/m^2.an) = 6{,}01 \sum_i f_i\ V\mu_i^3$$

On peut, de la même façon, déterminer l'énergie éolienne mensuelle, saisonnière,etc, en prenant les distributions de fréquences correspondantes et en calculant le coefficient multiplicatif de la puissance.

Dans la pratique, on calcule également la limite supérieure de l'énergie éolienne disponible qui est appelée : limite de Betz; elle s'écrit :

$$E_B\ (kWh/m^2.an = (16/27)E = 3{,}56 \sum_i f_i\ V\mu_i^3$$

Le calcul de cette dernière expression pour les différentes stations météorologiques permet, comme pour la vitesse du vent, de cartographier la variation géographique de l'énergie éolienne à 10 m de hauteur.



Lignes d'iso-valeur de l'énergie éolienne annuelle moyenne

Fig.2.9. Limite de Betz de l'énergie en kWh/an.m² à 10m en site standard

Cette carte, comme cela était prévisible, comporte des analogies importantes avec les cartes de la répartition géographique du vent.Les zones les plus intéressantes pour l'exploitation de l'énergie éolienne ressortent clairement : il s'agit du Nord-Ouest de la France, de l'Ouest et des zones de Mistral et Tramontane.

L'énergie éolienne, qui varie comme le cube de la vitesse du vent, va être extrêmement sensible aux causes de variation de la vitesse du vent. Nous donnons ci-après des estimations de l'importance de cette variation en supposant que les sites considérés ont un environnement homogène dans toutes les directions et que l'on se réfère à l'énergie éolienne obtenue à 10 m dans un site en rase campagne. La valeur du rapport E_s /E° est donnée pour différents cas dans le tableau suivant E_s est l'énergie éolienne sur le site considéré; E°, l'énergie éolienne de référence à 10 m en rase campagne.

Sites	E_s /E°	Influences
Rase campagne 10 m	1,0	Hauteur
Rase campagne 20 m	1,5	d°
Rase campagne 40 m	2,0	d°
Rase campagne 65 m	2,5	d°
Mer 10 m	1,9	Rugosité
Bocage 10 m	0,6	d°
Zone urbaine 10 m	0,25	d°
Mer 35 m	3,0	Hauteur + Rugosité

Le calcul de l'énergie éolienne disponible, tenant compte de la limite de Betz, peut également se faire à l'aide de la densité de probabilité de Weibull.On obtient pour expression :

$$E_B(kWh/m^2.an) = 3{,}56\ A^3 \Gamma [1 + 3/C)]$$

Connaissant les paramètres A et C de Weibull, le calcul de l'énergie éolienne s'effectue simplement en utilisant une table de la fonction classique Γ (gamma).

III. - ENERGIE EOLIENNE RECUPERABLE.

L'énergie éolienne récupérable va dépendre à la fois des caractéristiques de la machine et de la distribution statistique du vent. Ceci est illustré sur la figure 2.10. La courbe de production d'énergie est obtenue en multipliant les ordonnées des deux autres fonctions pour chaque vitesse de vent. La plupart des machines éoliennes ont une courbe de puissance qui présente l'aspect de celle de la figure 2.10. On peut ainsi déterminer les valeurs de la puissance récupérable en fonction de la vitesse du vent.

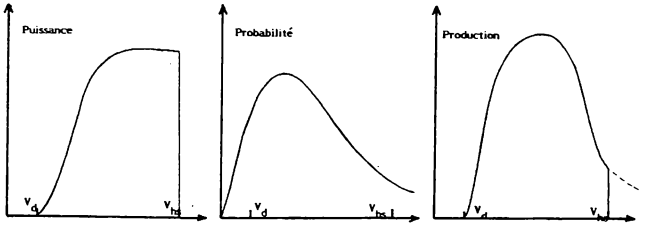


Fig. 2.10. Calcul de la production d'énergie annuelle d'une éolienne

Pour une éolienne idéale, ayant un facteur de conversion égal à l'unité, l'énergie éolienne annuelle récupérable à 10 m en rase campagne(limite de Betz) s'écrit :

$$E'_B(kWh/m^2.an) = 3{,}56 \sum_{i=D}^{i=N} f_i \, V\mu_i + [1 - F(V\mu_N)] \, V\mu_N^3$$

Dans le tableau suivant, nous avons pour 2 types d'éoliennes :

-éolienne I : $V\mu_D = 4$ m/s; $V\mu_N = 8$ m/s;

-éolienne II : $V\mu_D = 5$ m/s; $V\mu_N$ 10 m/s;

calculé le pourcentage annuel du temps de production d'énergie (T8 et T10) et le pourcentage d'énergie produite par rapport à l'énergie annuelle disponible (limite de Betz, 10 m de hauteur,rase campagne) pour 10 stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la France.

Régions	**Stations**	E_B	**T8**	**T10**	E'_{B8}/E	E'_{B10}/E
Nord-Ouest	Abbeville	870	53	39	74	93
D°	Cherbourg	1320	65	52	65	87
Ouest	Brest	860	55	42	79	98
D°	Saint-Nazaire	830	51	40	80	99
Centre	Melun	620	46	32	85	99
D°	Bourges	590	44	30	83	97
Est	Strasbourg	290	26	17	95	99
Sud-Ouest	Toulouse	490	37	26	87	99
Sud	Perpignan	1590	46	39	42	61
D°	Istres	1430	55	44	51	70

L'examen de ce tableau conduit aux remarques suivantes :

-l'utilisation de l'éolienne de type II permet, dans tous les cas, une meilleure récupération de l'énergie disponible. Cependant, si le gain est intéressant, par rapport au type I, pour les stations du Nord-Ouest et de l'Ouest de la France, il l'est moins pour les stations du Centre et il est pratiquement négligeable dans l'Est. Dans le Sud, la récupération est meilleure mais reste insuffisante.

-l'examen des temps de production permet de préciser les résultats précédents. En effet, l'utilisation pratique de l'énergie éolienne doit être un compromis optimal entre une récupération maximale d'énergie et un temps de production élevé. Ainsi, compte tenu des faibles valeurs du temps de production dans l'Est et le Sud-Ouest et du faible accroissement de récupération d'énergie entre le type d'éolienne I et le type II, le choix du type I paraît le mieux adapté. Cela est également le cas pour le Centre. Par contre, pour les autres régions où le vent est plus élevé (Nord-Ouest,Ouest et Sud), c'est le type II qui semble le mieux adapté.

IV. - CONCLUSION.

Cette étude montre l'importance des variations du vent à la fois dans le temps et dans l'espace.En raison de ces variations, l'utilisation des données de vent pour l'application à l'énergie éolienne doit être faite avec prudence; l'examen de la qualité des données est indispensable avant toute exploitation statistique.

L'utilisation de la distribution de Weibull, qui est bien adaptée aux données de vitesses moyennes de vent en France, permet de reconstituer facilement la distribution de fréquence de ces vitesses moyennes en n'importe quel point du territoire.

La cartographie des vitesses de vent et de l'énergie éolienne montre clairement les zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie éolienne : il s'agit du Nord-Ouest et de l'Ouest de la France sur une bande côtière de 100 km de large ainsi que les régions du Mistral et de Tramontane au Sud.

Le calcul de l'énergie éolienne est effectué à partir de la distribution des vitesses moyennes de vent et également modélisé à l'aide de la distribution de Weibull. Enfin, l'examen de l'énergie utilisable, en différents points du territoire, pour deux types de machines, permet de déterminer la machine la mieux adaptée aux caractéristiques du gisement en tenant compte des impératifs de production maximale et de durée de fonctionnement élevée.

CHAPITRE V

Aéromoteur à axe horizontal

I. - ACTION DU VENT SUR LES PALES

1. Action du vent sur une surface plane. - Une plaque plane placée dans un courant d'air de vitesse **V**, subit des forces exercées par les molécules d'air qui frappent cette surface. Orientons cette plaque de telle sorte que le bord faisant face au courant d'air, le bord d'attaque, soit placé plus haut que le bord arrière, le bord de fuite.La plaque fait un certain angle avec la direction du courant d'air, c'est l'angle d'attaque ou angle d'incidence.

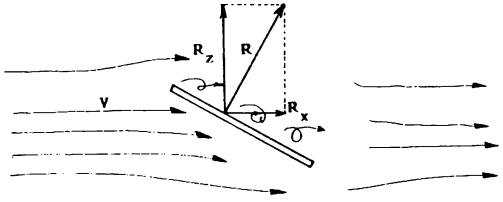
L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface.L'expérience montre que la résultante **R** de ces forces est perpendiculaire à la plaque. Le point d'application de **R**, pour des angles d'incidence compris entre 0 et 10°, se situe vers le tiers supérieur de la plaque.

Portance et traînée. - Le courant d'air tend à soulever la plaque vers le haut et il existe une force, dite de portance, R_z, perpendiculaire à la direction de la vitesse **V** de l'air. Si la plaque était maintenue de façon à pouvoir glisser horizontalement, elle serait poussée par l'air; la force mesurée dans le sens de **V** s'appelle la traînée, R_x.

La résultante **R** de l'action de l'air peut donc être projetée sur deux axes liés à la vitesse **V**. On définit ainsi :

-une composante R_x, parallèle à **V**, appelée traînée,

-une composante R_z , perpendiculaire à **V**, orientée positivement de bas en haut, appelée portance.



2. Avantages d'un profil aérodynamique. - En arrivant sur la plaque plane et en la dépassant, les filets d'air subissent des changements de direction et se transforment en tourbillons, engendrant une forte traînée. Si l'on substitue à la plaque une forme ayant un profil aérodynamique, le courant d'air va glisser régulièrement autour

du profil en épousant ses contours. Pour un même angle d'incidence, on obtient une traînée bien inférieure à celle de la plaque plane.

L'expérience montre que l'on obtient une bien meilleure portance en utilisant un profil à courbure accentuée sur sa partie supérieure.Les filets d'air qui suivent la courbure de la partie supérieure, l'extrados du profil, se déplacent plus rapidement que ceux qui suivent la courbure de sa partie inférieure, l'intrados.

Un filet d'air passant le long de l'extrados a sa section qui se réduit et la pression diminue.Inversement, les molécules d'air circulant sous l'intrados ont tendance à ralentir leur mouvement et à se comprimer, entraînant une augmentation de la pression. Le profil est donc aspiré par la zone de basse pression existant au-dessus de l'extrados et poussé par la zone de haute pression créée sous l'intrados.

On peut mesurer la distribution de la portance en perçant des trous le long d'un profil, du bord d'attaque au bord de fuite, et en reliant chaque trou à un manomètre à haute sensibilité.Environ les 3/4 de la portance sont dus à la dépression au-dessus de l'extrados et 1/4 provient de la surpression exercée sur l'intrados. Le minimum de presion au-dessus de l'extrados se situe un peu en arrière du bord d'attaque et la pression s'annule au niveau du bord de fuite.La résultante **R** des forces élémentaires réparties sur toute la surface du profil, aura son point d'application situé, en général, vers le tiers de la partie avant du profil.

3. Action du vent sur un moteur éolien. - Une éolienne est essentiellement formée d'un ensemble de pales subissant l'action du vent.Les forces qui s'exercent sur les pales font tourner l'arbre du moteur éolien sur lequel elles sont fixées.

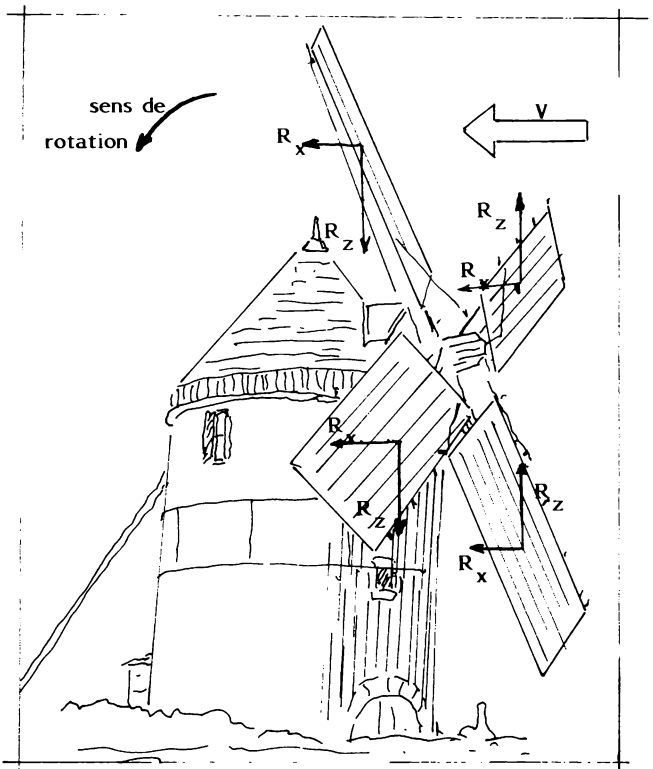
Pour comprendre cette action de rotation, considérons un moteur éolien formé de quatre pales rectangulaires plates, fixées sur un arbre horizontal.C'est le cas des moulins à vent à ailes à planches. Les ailes du moulin forment des plans ayant un certain angle d'incidence par rapport au plan de rotation des poutres, fixées sur l'arbre, qui supportent les planches.

Supposons les pales immobiles et traçons pour chaque pale la résultante des forces dues au vent. Les composantes R_x sont toutes dirigées dans le sens du vent et exercent seulement des forces de poussée parallèles à l'axe de l'arbre.
Les composantes R_z sont parralèles entre elles et situées dans un plan perpendiculaire à la direction **V** du vent.Mais ces composantes sont de sens opposés deux à deux; elles créent un couple moteur autour de l'axe de rotation et l'ensemble se met à tourner.

4. Vent relatif. - Lorsque le moteur éolien tourne, le phénomène se complique car chaque tranche de pale va subir un vent différent. Une tranche située à la distance r de l'axe de rotation est en effet animée d'une vitesse :

$$U(r) = rw$$

w étant la vitesse angulaire de rotation, exprimée en radians par seconde.



Le moulin de la Roche, à la Possonnière (M-et-L)

Moulin à ailes à planches

Action du vent sur un moteur éolien, au démarrage

Considérons alors un corps qui se meut dans un air immobile à une vitesse **U.** Ce corps subit l'équivalent d'un vent de même vitesse absolue mais dirigé en sens opposé à sa direction de déplacement.Le "vent apparent" qu'il subit a donc une vitesse **-U.**

Si l'air environnant est lui-même animé d'une vitesse propre **V,** l'objet en mouvement, à la vitesse **U,** va subir un vent de vitesse **W** telle que :

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}-\mathbf{U}$$

Par définition, on appelle vent apparent ou vent relatif, le vent de vitesse **W.**

Pour une tranche de pale, située à la distance r de l'axe de rotation du moteur éolien, le vent relatif sera tel que :

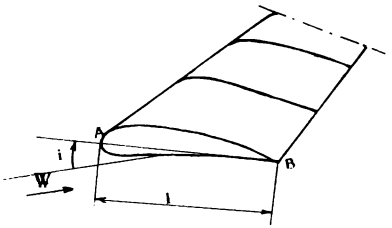
$$\mathbf{W} = \mathbf{V}-\mathbf{U}(r) = \mathbf{V}-r\mathbf{w}$$

Le vecteur **U**(r) est situé dans le plan de rotation des pales et son module est U(r)=rw. Ce sera ce vent relatif **W** qu'il faudra considérer pour calculer les forces agissant sur les pales.

II. - LES PALES DES EOLIENNES

1. Définitions. - Les pales des éoliennes modernes ont des profils aérodynamiques pour lesquels on rappelle quelques définitions (voir schéma). L'arête B du profil constitue le bord de fuite et les points du profil les plus éloignés de B constituent le bord d'attaque.

La droite AB est la corde du profil; la distance AB est la largeur l du profil. L'angle d'incidence i est l'angle formé par la corde du profil et la direction du vent relatif **W**.



2. Exemples de profils. - Les profils utilisés pour les éoliennes rapides sont des profils qui ont été étudiés par divers laboratoires d'aérodynamiques. Ces profils sont désignés le plus souvent par le nom du laboratoire suivi d'un nombre de référence, par exemple : Göttingen 623; NACA 4415; etc.

On classe généralement les profils en :

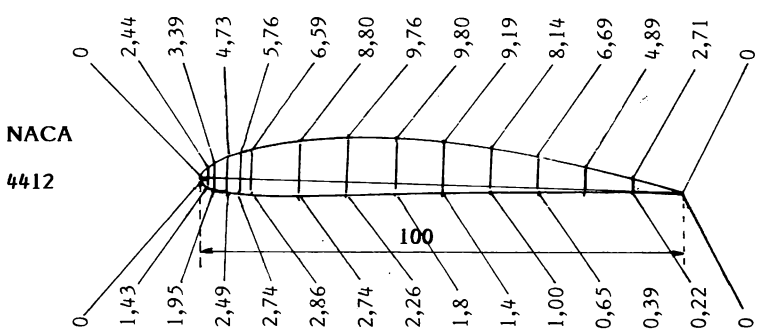
-profils biconvexes dont l'intrados et l'extrados sont convexes.Ce sont les plus utilisés pour les pales d'éoliennes.

-profils plans convexes dont l'intrados est plan et l'extrados convexe.

-profils cambrés et hyper-cambrés, à extrados convexe et intrados concave.

Les profils biconvexes symétriques, à intrados et extrados identiques, sont utilisés pour les éoliennes à axe vertical de type Darrieus bien que des profils non symétriques aient été expérimentés récemment en vue d'assurer l'auto-démarrage de ce type d'éolienne.

Les profils des éoliennes rapides à axe horizontal sont en général de type plan convexe (Göttingen 623, par exemple) ou de type biconvexe non symétrique (NACA 23015,4412,etc).



3. Coefficients aérodynamiques de portance et de traînée. - L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre une force résultante **R** dépendant de divers paramètres, soit :

$$R = 0{,}5\ d\ C_r\ W^2\ S$$

où C_r est un coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total; d est la masse spécifique de l'air; W le module du vecteur vitesse **W** du vent relatif; S la surface de l'élément de pale considéré.

La projection de la résultante **R**, sur un système d'axes liés à la vitesse relative **W**, nous donne :

-une composante R_x parrallèle à **W**; c'est la traînée d'expression :

$$R_x = 0{,}5\ C_x\ d\ W^2\ S$$

-une composante R_z perpendiculaire à **W** et orientée positivement de bas en haut; c'est la portance d'expression :

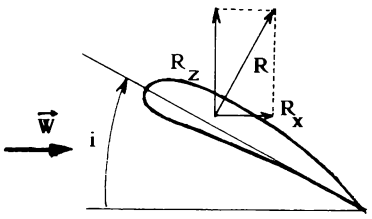
$$R_z = 0{,}5\ C_z\ d\ W^2\ S$$

Les coefficents C_x et C_z sont respectivement les coefficients aérodynamiques de traînée et de portance. La relation :

$$R^2 = R_x^2 + R_z^2$$

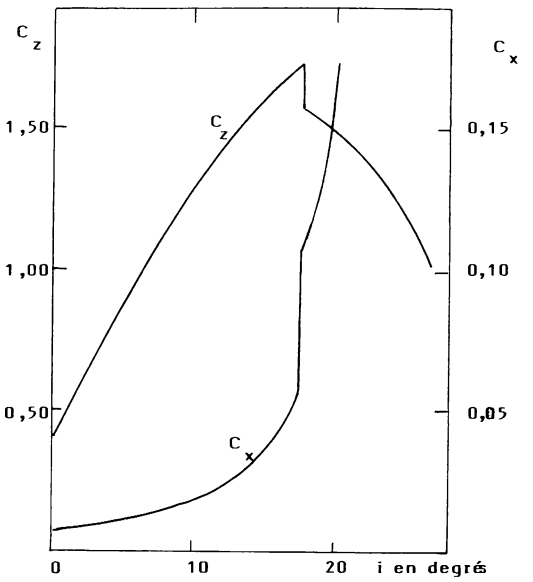
montre que les coefficients aérodynamiques sont liés entre eux par la relation :

$$C_r^2 = C_x^2 + C_z^2$$



4. Influence de l'angle d'incidence sur C_x et C_z. - La traînée et la portance sont des forces qui dépendent de l'angle d'incidence i du profil par rapport au vent relatif.Lorsque l'angle d'incidence augmente, la traînée et la portance vont également augmenter. L'effet de portance croît plus vite que l'effet de traînée jusqu'à un certain angle d'incidence. A partir de cet angle, de l'ordre de 15°, la portance diminue rapidement et la traînée continue de croître; on dit que l'on atteint l'angle de décrochement. Ce phénomène est dû à l'accroissement de la turbulence, créée par l'écoulement de l'air sur l'extrados, qui devient très importante, d'où une chûte rapide de la portance.

Les coefficients aérodynamiques, C_x et C_z, sont les paramètres caractéristiques qui mesurent ces variations de traînée et de portance en fonction de l'angle d'incidence. La figure suivante représente, à titre d'exemple, les variations de ces coefficients pour un profil donné.



Variations des coefficients de portance C_z et de traînée C_x en fonction de l'angle d'incidence i -Profil NACA 4412

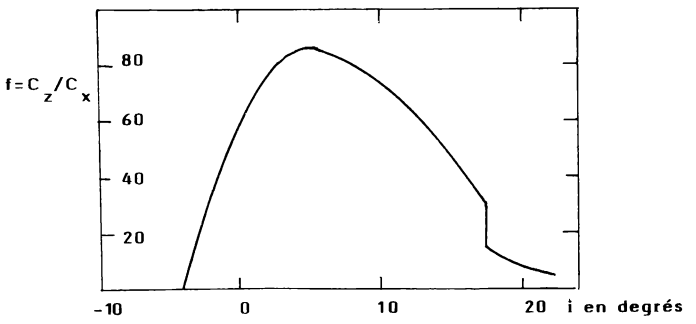
5. Finesse d'un profil. - La portance étant la force motrice d'une éolienne à pales aérodynamiques, le constructeur cherchera à l'augmenter. Par contre la traînée devra être minimale.

Par définition, le quotient de la portance par la traînée est appelée la finesse du profil. On a :

$$f = R_z/R_x = C_z / C_x$$

C'est une grandeur fondamentale qui intervient directement dans le rendement aérodynamique d'une pale. On verra que plus la finesse est élevée, meilleur est le rendement.

Les variations de la finesse, en fonction de l'angle d'incidence, montrent que f passe par un maximum pour un certain angle d'incidence, généralement inférieure à 10° pour les profils usuels.



Profil NACA 4412 - Variations de la finesse f en fonction de i

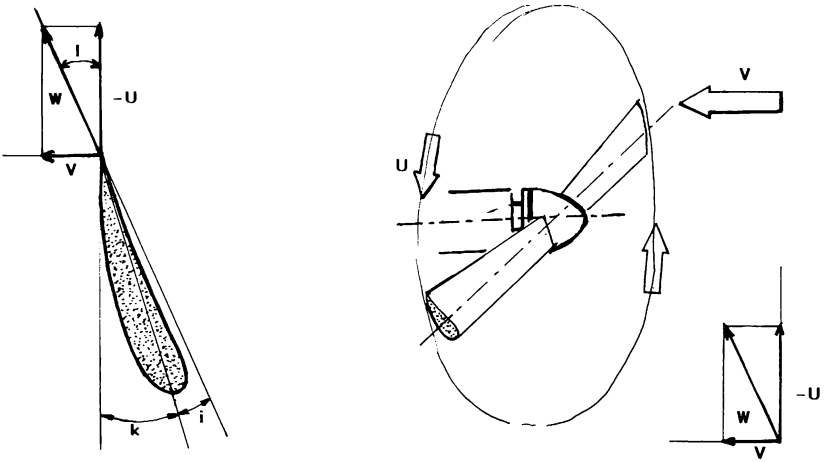
III. - RENDEMENT AERODYNAMIQUE D'UNE PALE

1. Définitions. - Les pales d'une éolienne sont fixées sur un arbre servant d'axe de rotation, ce dernier étant parallèle à la direction du vent **V** lorsque l'éolienne tourne.Le plan de rotation des pales est donc perpendiculaire à la direction **V**.

L'angle de calage k d'une pale est l'angle que fait la corde du profil avec le plan de rotation des pales.L'axe longitudinal autour duquel on peut faire varier l'angle de calage s'appelle l'axe de la pale.

On notera I l'angle que fait le vent apparent **W** avec le plan de rotation des pales. Cet angle est la somme des angles d'incidence i et de calage k :

$$I = i + k$$



2. Actions aérodynamiques sur un élément de pale. - Considérons une tranche de pale, d'épaisseur dr, située à la distance r de l'axe de rotation. Soit dS la surface de cet élément de pale soumise à l'action du vent apparent **W**. La force élémentaire **dR** qui s'exerce sur cet élément, due au vent relatif **W**, a pour composantes :

-la traînée, projection de **dR** sur l'axe orienté suivant **W**, soit :

$$dR_x = 0{,}5\ C_x\ d\ W^2\ dS$$

-la portance, projection de **dR** sur l'axe perpendiculaire à **W** et dans le plan de section de pale, soit :

$$dR_z = 0{,}5\ C_z\ d\ W^2\ dS$$

Puissance motrice utile.

Déterminons le moment élémentaire dM de la force **dR** par rapport à l'axe de rotation. Ce moment est égal au produit de la longueur r du bras de levier par la projection de **dR** sur la direction de déplacement de l'élément de pale, cette direction

étant donnée par la vitesse **U.** Cette projection dR_u vaut :

$$dR_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I$$

Le moment élémentaire dM est :

$$dM = r [dR_z \sin I - dR_x \cos I]$$

soit en remplaçant par les expressions des composantes :

$$dM = 0{,}5\ d\ W^2\ r\ dS [C_z \sin I - C_x \cos I]$$

Calculons la puissance élémentaire produite par la force **dR** sur l'élément de pale tournant à la vitesse angulaire w; on a :

$$dP_u = w\ dM = 0{,}5\ d\ W^2\ w\ r\ dS [C_z \sin I - C_x \cos I]$$

Puissance du vent agissant sur un élément de pale.

Le travail que fournit le vent en une seconde, est le produit scalaire de la force **dR** par le vecteur correspondant au déplacement du point d'application de cette force. Pour un observateur lié au déplacement du vent, l'éolienne se déplacerait en une seconde d'une distance égale à la vitesse **V** du vent. Par suite, la puissance élémentaire du vent, sur l'élément de pale, sera :

$$dP_v = \mathbf{dR} \cdot \mathbf{V}$$

La projection de **dR** sur la direction **V** du vent, supposée parallèle à l'axe de rotation de l'éolienne, donne :

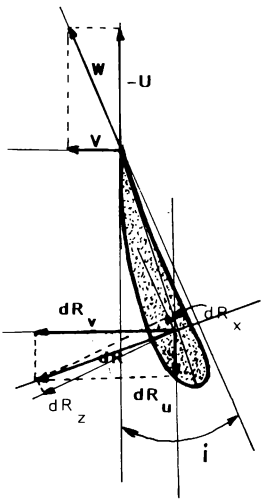
$$dR_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I$$

Par substitution de l'expression des composantes, il vient :

$$dR_v = 0{,}5\ d\ W^2\ dS [C_z \cos I + C_x \sin I]$$

La puissance élémentaire du vent agissant sur l'élément de pale est donc

$$dP_v = 0{,}5\ d\ W^2\ V\ dS [C_z \cos I + C_x \sin I]$$



3. Rendement aérodynamique d'un élément de pale. - Le rendement aérodynamique théorique μ d'un élément de pale est le rapport entre la puissance motrice utile et la puissance du vent agissant sur cet élément. On a :

$$\mu = dP_u / dP_v = w\, dM / V\, dR_v = U\, dR_u / V\, dR_v$$

Tenant compte de :

$$\cotg I = U/V$$

on obtient :

$$\mu = \cotg I \; \frac{dR_z \sin I - dR_x \cos I}{dR_z \cos I + dR_x \sin I}$$

L'utilisation de la finesse : $f = dR_z/dR_x$, permet d'écrire l'expression précédente sous la forme :

$$\mu = \frac{1 - \frac{\cotg I}{f}}{1 + \frac{\tg I}{f}}$$

Cette dernière expression montre que le rendement μ sera d'autant plus élevé que la finesse f sera grande. Or on a vu précédemment que f passe par un maximum pour une incidence donnée i_M.Par suite, pour avoir un rendement optimum d'un élément de pale situé à la distance r de l'axe de rotation, il faudra que l'angle d'incidence de cet élément soit égal à i_M.

4. Vrillage des pales. L'angle d'incidence est donné par la différence entre l'angle I (angle que fait le vent apparent **W** avec le plan de rotation des pales) et l'angle de calage k, soit :

$$i = I - k$$

Puisque l'on a :

$$I = \text{arctg}\,(V/U) = \text{arctg}\,(V/wr)$$

l'angle I varie le long de la pale en fonction de la distance r.Par suite, pour que l'angle d'incidence soit égal à sa valeur maximale i_M tout au long de la pale, pour un profil donné, il faut que l'angle de calage varie en même temps que I. La pale qui aura le meilleur rendement aérodynamique est donc une pale vrillée.

Puisque tg I =(V/wr) et que la tangente varie dans le même sens que son argument, il en résulte que l'angle I diminue lorsque r augmente.Par conséquent, pour que (I-k) reste fixe, il faut que l'angle de calage diminue lorsque l'on va du pied de pale à son extrémité. Une pale vrillée aura donc un angle de calage important en pied de pale, plus faible à son extrémité.

5. Rendement aérodynamique d'une pale. - Le couple moteur d'une pale est la somme de tous les moments élémentaires agissant sur chaque élément de pale.

La puissance P_u recueillie sur l'arbre d'un moteur éolien sera obtenue par intégration des puissances élémentaires dP_u calculées précédemment. La puissance totale P_v du vent agissant sur les pales sera calculée de même par intégration des puissances élémentaires dP_v pour chaque élément de pale.

Le rendement aérodynamique d'une pale est alors :

$$\mu^* = P_u / P_v$$

6. Paramètre de fonctionnement. - Le rendement aérodynamique fait intervenir le paramètre cotg I qui est égal à U(r)/V. Pour une éolienne de rayon R, la vitesse en bout de pale est :

$$U(R) = w\ R$$

Par définition le rapport entre la vitesse U(R) de l'extrémité des pales et la vitesse V du vent :

$$h = U(R)/V = wR/V$$

est appelé le "paramètre de fonctionnement" des éoliennes.

Ce rapport est appelé parfois "paramètre de vitesse" ou également "vitesse spécifique" mais ces appellations ne sont plus retenues actuellement.

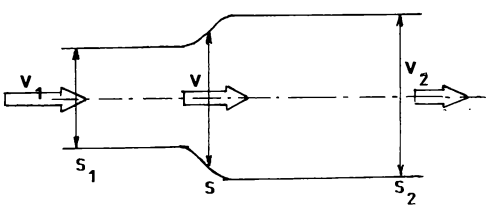
On verra que les performances des éoliennes dépendent essentiellement de leur paramètre de fonctionnement et de l'angle de calage des pales.

IV. - PUISSANCE D'UN MOTEUR EOLIEN

1. Théorie de Betz. - Pour un vent donné, la puissance d'un moteur éolien dépendra du rendement aérodynamique des pales. La puissance maximale susceptible d'être recueillie par une éolienne peut cependant être calculée sans faire d'hypothèse sur le profil des pales mais à l'aide d'une théorie très générale établie par Betz.

On considère pour cela un moteur éolien dont les pales balaient une surface S et soit V la vitesse du vent au niveau des pales. Le moteur est placé dans un air animé loin en amont d'une vitesse V_1 et en aval d'une vitesse V_2.

Une partie de l'énergie cinétique du vent étant utilisée pour faire tourner l'éolienne, la vitesse V_2 est inférieure à V_1 et la veine d'air traverse donc le moteur éolien en s'élargissant.Soient S_1 et S_2 les sections amont et aval de la veine de fluide.



La masse d'air m déplacée par seconde est :

$$m = d\,S_1\,V_1 = d\,S\,V = d\,S_2\,V_2$$

d étant la masse spécifique de l'air.

Calculons la variation d'énergie cinétique E de la masse d'air qui traverse par seconde le moteur éolien :

$$E = 0{,}5\,d\,S_1\,V_1^3 - 0{,}5\,d\,S_2\,V_2^3$$

Tenant compte des relations qui précèdent, il vient :

$$E = 0{,}5\,d\,S\,V\,[\,V_1 + V_2\,]\,[\,V_1 - V_2\,]$$

D'autre part, la force F exercée sur le moteur éolien par l'air est égale à la variation de la quantité de mouvement du fluide lors de la traversée de la surface S. On a :

$$F = m\,V_1 - m\,V_2 = d\,S\,V\,[\,V_1 - V_2\,]$$

Le travail produit par cette force dont le point d'application se déplace d'une distance V en une seconde, par rapport aux molécules d'air en mouvement, est la puissance absorbée par le moteur éolien, soit :

$$P = F\,V = d\,S\,V^2\,[\,V_1 - V_2\,]$$

La variation d'énergie cinétique E est donc égale à la puissance P absorbée d'où :

$$[V_1 - V_2]\quad 0{,}5\,d\,SV\,[\,V_1 + V_2\,] = d\,S\,V^2\,[\,V_1 - V_2\,]$$

Cette dernière relation donne la vitesse V au niveau des pales :

$$V = 0{,}5\,[\,V_1 + V_2\,]$$

Remplaçant V par cette valeur dans l'expression de la puissance P, il vient

$$P = 0{,}25\,d\,S\,[\,V_1 + V_2\,]^2\,[\,V_1 - V_2\,]$$

Introduisons un paramètre a tel que :

$$V_2 = a\,V_1$$

a est compris entre 0 et 1 puisque V_2 est inférieure à V_1. La puissance devient :

$$P = 0{,}25\,S\,d\,V_1^3\,[\,1 + a\,]^2\,[\,1 - a\,]$$

Cherchons la valeur de a correspondant à la puissance P maximale. La résolution de l'équation dP/da = 0, nous donne une valeur $a_M = 1/3$. Reportant cette valeur de a_M dans l'expression de P, on obtient :

$$P_M = \frac{16}{27}\,[\,0{,}5\,S\,d\,V_1^3\,]$$

Pour les calculs usuels, on assimile souvent V_1 à la vitesse V et l'on considère qu'une éolienne ne peut recueillir plus des (16/27) de l'énergie totale du vent qui est égale à $(0{,}5\,S\,d\,V^3)$, cette quantité étant appelée la limite de Betz.

La considération d'une telle limite théorique est un peu floue car la quantité $(0{,}5\,S\,d\,V_1^3)$ ne représente pas dans le cas général l'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse le moteur éolien. En effet, pour $a_M = 1/3$, la vitesse V_M maximale est :

$$V_M = [V_1 + V_2]\,/2 = (2/3)\,V_1$$

Puisque l'on a : $SV_M = (2/3)\,SV_1 = S_1V_1$, la puissance maximale P_M devient :

$$P_M = (8/9)\,[\,0{,}5\,d\,S_1\,V_1^3\,]$$

La quantité (0,5 d S_1 V_1^3) représente l'énergie cinétique de la masse d'air qui passe à travers la surface S des pales. L'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un moteur éolien est donc égale aux (8/9) de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse.

En conséquence, il semble plus précis d'exprimer les données concernant l'énergie éolienne en retenant l'énergie cinétique totale du vent et non la "limite de Betz". De plus, le facteur de conversion C_p d'une éolienne fait intervenir directement l'énergie totale du vent et non la limite de Betz.

2. Facteur de conversion d'un élément de pale - La puissance susceptible d'être retirée, par un élément de pale de surface dS, de la veine fluide élémentaire traversant l'éolienne entre les cercles de rayon r et r+dr, est donnée par l'expression calculée précédemment :

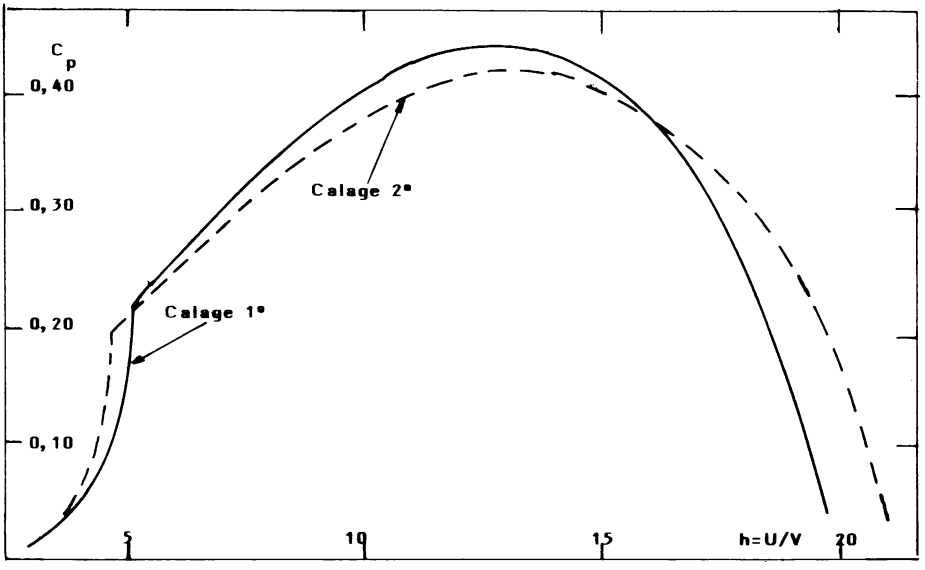
$$dP_u = w\ dM = 0{,}5\ d\ W^2\ w\ r\ dS\ [\ C_z \sin I - C_x \cos I\ ]$$

La puissance totale du vent, à travers cette même couronne comprise entre r et r+dr, donc de surface [2.3,14.r dr], est telle que :

$$dP_t = 0{,}5\ d\ [6{,}28\ r\ dr]\ V^3$$

Le facteur de conversion local C_{pl} de l'élément de pale est défini par :

$$C_{pl} = dP_u / dP_t$$



Facteur de conversion d'une éolienne bipale -Profil GÖTTINGEN 548-

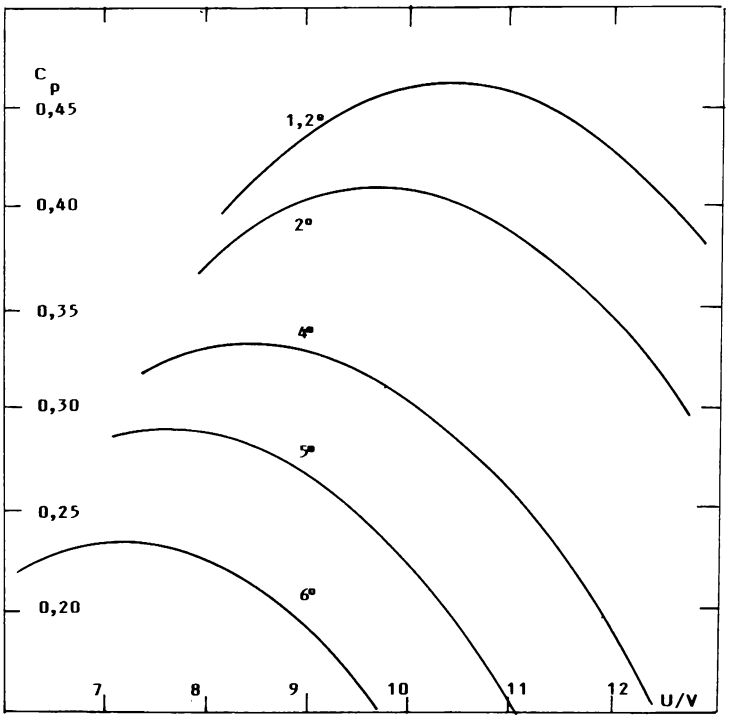
3. Facteur de conversion d'un moteur éolien. - Par définition, le rapport de la puissance fournie sur l'arbre d'une éolienne, à la puissance théorique que peut fournir l'écoulement libre de la masse d'air traversant la surface balayée par les pales de l'éolienne, s'appelle le "facteur de conversion". On le notera C_p.

Soit P la puissance mécanique au niveau de l'arbre d'une éolienne et E l'énergie cinétique du vent à travers la surface S balayée par les pales de cette éoliennes, on a :

$$C_p = P/E = P / [0,5\ d\ S\ V^3]$$

Le facteur de conversion d'un moteur éolien dépendra des facteurs locaux C_{pl} et peut être calculé théoriquement. Le facteur de conversion dépend seulement du paramètre de fonctionnement h et de l'angle de calage k des pales.

Les courbes donnant les variations du facteur de conversion en fonction du paramètre de fonctionnement h , montrent que C_p passe par un maximum quel que soit le type d'éolienne. Ce maximum correspondant à une valeur donnée h_M ,cette dernière étant elle-même fonction de l'angle de calage considéré.



Facteur de conversion - Eolienne tripale UNICUM - Profil NACA 23015

CHAPITRE VI
Éoliennes à axe horizontal

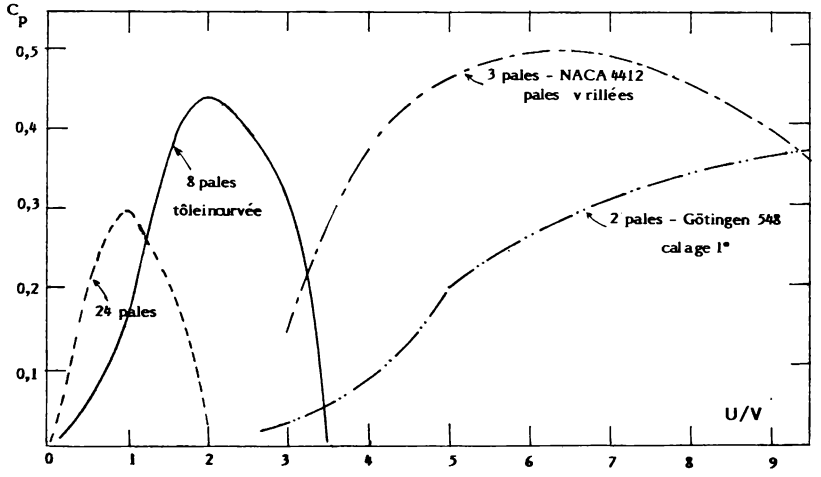
I. - TYPES D'EOLIENNES A AXE HORIZONTAL.

La majorité des éoliennes actuellement en service sont des machines à axe horizontal. Ce sont les modèles commerciaux les plus répandus et les plus puissantes installations qui ont été construites ou sont en fonctionnement, sont à axe horizontal.

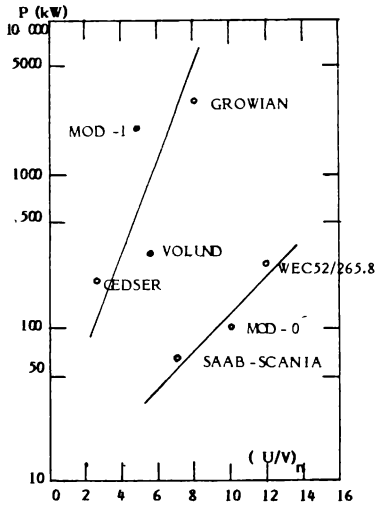
On peut classer les éoliennes en fonction de leur paramètre optimal de fonctionnement qui est, pratiquement, en rapport assez étroit avec leur nombre de pales. En général, le nombre de pales diminue lorsqu'augmente le paramètre optimal de fonctionnement. De manière approximative, on peut donc faire le classement suivant :

-éoliennes rapides, comportant 2 ou 3 pales, dont le paramètre de fonctionnement est supérieur à 5. Ces éoliennes ont des vitesses élevées de rotation mais le couple au démarrage est assez faible. C'est le type de moteur éolien convenant parfaitement pour les aérogénérateurs.

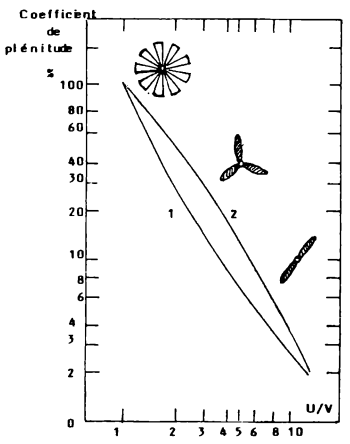
-éoliennes à vitesses moyennes, comportant de 3 à 6 pales. Le facteur de conversion est maximum pour un paramètre de fonctionnement compris entre 3 et 4.Le couple de démarrage est plus élevé et ces éoliennes commencent à tourner pour des vents assez faibles, de l'ordre de 3 à 4 m/s.



Facteur de conversion d'éoliennes à axe horizontal



Paramètre de fonctionnement nominal d'éoliennes de grande puissance



Quotient de la surface balayée par la surface apparente des pales. 1:pales sous-dimensionnées au voisinage de l'axe 2 : pales bien dimensionnées.

-éoliennes à vitesses lentes comprenant un nombre de pales compris entre 6 et 24, et dont le paramètre de fonctionnement se situe vers 1 ou 2. Ce sont les éoliennes de pompage classiques qui présentent un couple important au démarrage.

En règle générale, le rapport de la surface totale des pales à la surface balayée par celles-ci, diminue lorsque le paramètre de fonctionnement augmente.

Les éoliennes comporte les élements suivants :

-un ensemble de pales dont l'angle de calage est fixe pour les éoliennes lentes et qui est souvent variable pour les éoliennes rapides;

-un système de régulation et de freinage;

-un système d'orientation par rapport au vent;

-un ensemble d'organes d'utilisation du couple du moteur éolien;

-une structure porteuse permettant de placer l'éolienne suffisamment haut.

II. - LA FABRICATION DES PALES.

par **Jacques EUVRIE**
Ingénieur cellule hydraulique
Gérant de la **S.A.N.E.**
Société des Applications Nouvelles de l'Energie

L'hélice d'une éolienne est un ensemble composé d'un moyeu supportant deux à six pales pour les machines dites rapides. D'une façon générale, la vitesse de rotation de l'hélice est contrôlée par la variation de l'angle de calage de la pale, ce qui implique de pouvoir obtenir une rotation de la pale suivant son axe longitudinal.

1. Problèmes de fatigue des pales. - Les pales sont soumises à des efforts importants et variés, citons :

-force centrifuge : traction sur le moyeu;

-poussée : flexion égale à environ dix fois le couple moteur;

-moments alternés et efforts gyroscopiques dus aux changements de direction du vent;

-déséquilibre dynamique de l'hélice dû à la régulation par variation du pas;

-rafales dues aux vents forts et donc instables en direction et en puissance;

-couplage entre le mode vibratoire du pylône et de l'hélice;

-déséquilibre de l'hélice par création de givre sur le bord d'attaque;

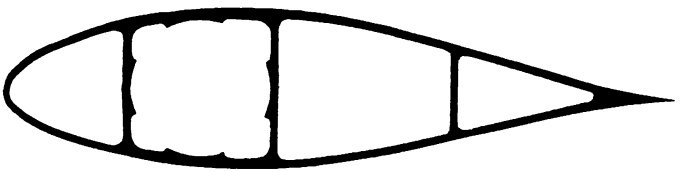
-érosion du bord d'attaque par le sable et l'eau.

Cette liste résume les principales fatigues auxquelles sont soumises les pales. Jusqu'à un diamètre de l'ordre de 5m, les efforts à passer sont suffisamment faibles pour ne pas avoir à sophistiquer la fabrication des pales aussi recherche-t-on la solution la plus économique possible.

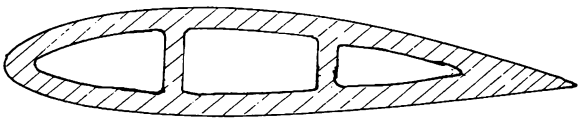
2. Matériaux utilisés pour la fabrication des pales.-

Le bois. - Le bois recherché est droit de fil, sans noeud et sec. Les bois les plus utilisés sont pour les résineux : l'épicéa, le spruce, le sapin du Haut Jura, le pin d'Arkangelsk, le pin de l'Orégon; pour les feuillus : l'okoumé, l'acajou, le hêtre, le frêne.

Le bois est un matériau qui manque d'homogénéité, qui présente des différences de densité pouvant évoluer dans le temps, qui peut se déformer et est sensible à l'érosion. Cependant, suivant de nouvelles méthode de traitement par imprégnation, on peut pallier en partie ces défauts.



Profilé en alliage d'aluminium - Aérogénérateurs AEROTURBINE -
Fabrication par filière - Profil et corde constants -



Profilé de filière en alliage d'aluminium -Aérogénérateur AEROWATT - Profils et corde constants -

Le lamellé-collé. - C'est un matériaux composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensembles, soit d'essences différentes, soit de même nature. On peut encore alterner des matériaux différents tels que bakélite, feuillard d'acier,etc. De plus, il existe sur le marché des contreplaqués qui sont autre chose qu'un simple CTBX, en particulier du spécial multiplis, formé de plis minces de même épaisseur (1,3 à 1,4 mm) dans des essences sélectionnées (acajou, par exemple), bien adapté au travail en flexion et réalisé dans les meilleures conditions possibles (collage à chaud, sous presse).

Les alliages d'aluminium. - Trois types de construction sont utilisés :

-la tôle sur longerons, pliée et rivetée. C'est une technique couramment utilisée en aéronautique et permettant la fabrication de pales à profil évolutif, calage et corde variables

-les profilés de filières : solution économique mais limitant les possibilités de fabrication à une pale à corde, profil et calage constants.

-l'étiré à froid : très couteux, réservé à des applications particulières et limitant les possibilités de réalisation.

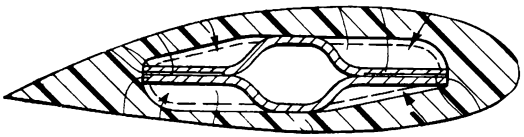
Fabrication de pales en tôle cintrée et rivetée sur longerons

Les matériaux composites. - Leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

On peut faire varier la quantité de matière le long de la pale, c'est-à-dire passer d'un profil ne possédant qu'une peau très mince en extrémité, à un profil plein en pied de pale.On peut faire passer les efforts par une section considérée, représentant le moment d'inertie nécessaire mais également pouvant représenter un centrage correct : on peut considérer, en première approximation, que le centre de poussée aérodynamique, en régime subsonique, est situé au quart avant alors que son centre de gravité est situé au tiers avant, donnant ainsi naissance à un rappel à plat de la pale.

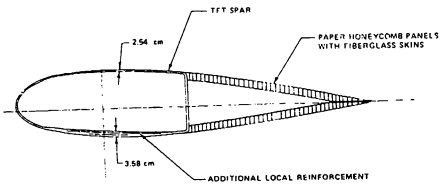
Les matériaux utilisés sont les tissus de verre "r" et "e" en serge, unidirectionnel, satin, roving,etc; le kevlar; le carbone. On trouve actuellement des tissus composés de plusieurs matériaux tels que : verre-carbone, verre-kevlar, carbone-kevlar, dans différents grammages et différents tissages.

Afin de pouvoir obtenir des pièces de même poids volumique, on travaille avec des tissus pré-imprégnés de résine qui, par la suite, sont passés au four à des températures se situant entre 90 et 140° C. La construction la plus couramment utilisée est le pain de mousse enrobé.



Brevet français n° 2 449 207 - Centre de Recherches FIAT (Italie)

Pale formée d'un élément tubulaire constitué de pièces en tôle emboutie de section en gouttière. Recouvrement extérieur en matériau composite porté par la structure.



Section d'une pale de l'aérogénérateur américain MOD-1

Profil : NACA 23 015 - Longueur totale de pale : 30,7 m- Section située à 15,4 m Corde : 3,20m - Epaisseur :0,80 m - Pale en matériau composite -

III. - LES SYSTEMES DE REGULATION.

Lorsque le vent augmente, il faut éviter que l'éolienne tourne à de trop grandes vitesses et diminuer les contraintes mécaniques qui pourraient entraîner la destruction de la machine. Dans ce but, divers systèmes permettent de limiter ces contraintes et de réguler la vitesse. Il semble actuellement que, pour les éoliennes rapides, la technique de variation de l'angle de calage s'impose de plus en plus. Pour les éoliennes lentes, divers systèmes à empennage permettent de ne plus avoir l'éolienne face au vent.

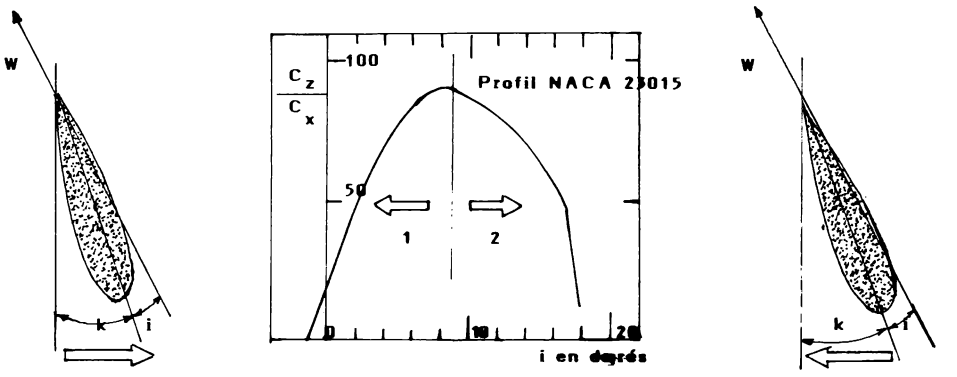
1. Régulation par variation du calage des pales. - Le couple moteur d'une éolienne dépend de l'angle I que fait le vent relatif **W** avec le plan de rotation des pales. Cet angle I étant la somme des angles d'incidence, i, et de calage, k, la variation de ce dernier permet de modifier les efforts qui s'exercent sur les pales. Divers mécanismes sont employés dans ce but mais les régulateurs utilisant la force centrifuge sont les plus employés.

On a vu précédemment que la finesse, f, varie en fonction de l'angle d'incidence, i, et présente un maximum pour une incidence optimale i_M. La variation du calage, à partir d'un calage optimal correspondant à i_M , va entraîner un changement de l'angle d'incidence et par suite une diminution de la finesse donc du couple moteur.

Deux méthodes peuvent être employées pour ce type de régulation :

-soit diminuer l'angle de calage, ce qui entraîne une augmentation de l'angle d'incidence et une diminution de la finesse. A partir d'un angle d'incidence important, la pente de la finesse s'accroît et une faible variation du calage permet d'obtenir une diminution importante de la finesse. C'est la régulation par décrochage aérodynamique.

-soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence et entraîne une diminution de la finesse. C'est la régulation par mise en drapeau. Pour un profil donné, les variations de l'angle de calage devront être plus importantes que pour la méthode précédente, tout au moins au-delà d'un certain angle d'incidence.



Régulation par variation du calage des pales

1.Régulation par mise en drapeau k augmente, i diminue

2. **Régulation par décrochage aérodynamique** -k diminue,i augmente

2. Régulation par augmentation du calage. - Divers systèmes, utilisant la force centrifuge, permettent d'augmenter l'angle de calage des pales et d'aboutir à un freinage aérodynamique par variation de la finesse. La régulation par mise en drapeau entraîne moins de contraintes sur les pales que le décrochage aérodynamique.

Aérogénérateurs UNICUM. - (Brevet français n° 74 400324, du 16.10.1974 et Certificat d'addition N° 2 325 823 du 24.09.1975).

La société UNICUM est une entreprise spécialisée dans l'outillage à tube et les organes de transmission. Elle a diversifié sa production, en 1976, en développant un aérogénérateur de 7 m de diamètre, d'une puissance nominale de 5 kW par vent de 9 m/s (un réglage de la régulation permet d'obtenir jusqu'à 7 kW nominaux). Les pales sont en alliage léger, de profil NACA 23015, de corde 0,175 m. Un safran assure le positionnement face au vent. Le pylône proposé est tubulaire, d'un diamètre de 0,324 m, et est articulé à sa base.

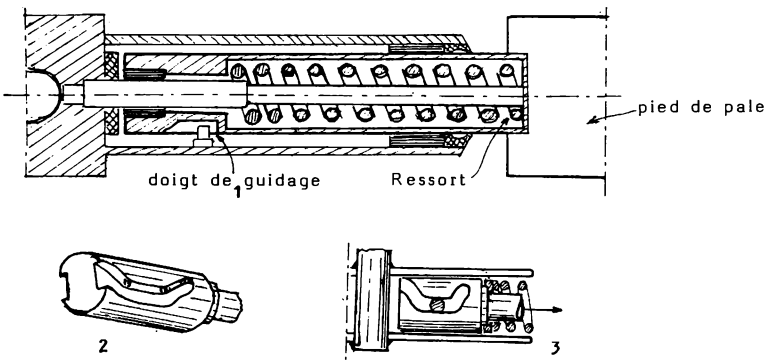
La régulation s'effectue par variation de l'angle de calage avec mise en drapeau. Chaque pale de l'hélice est montée sur un axe qui coulisse à l'intérieur

d'un tube sur lequel est fixé une goupille radiale qui s'insère dans une rainure creusée à la périphérie de l'arbre porte-pale. Un ressort pré-contraint maintient au repos la pale en position de démarrage avec un angle de calage de 26°.

Lorsque les pales tournent, la force centrifuge "tire" les pales vers l'extérieur, l'arbre porte-pale écrase le ressort et se déplace vers l'extérieur. Le doigt de guidage, fixé sur la douille extérieure, glisse dans la rainure placée à la périphérie de l'arbre porte-pale et le contraint à un mouvement de rotation entraînant une variation de calage. La géométrie de cette rainure est fonction de la loi de calage déterminée par les essais en soufflerie. Lorsque la vitesse de rotation diminue, la force centrifuge décroît et le ressort ramène la pale vers sa position de démarrage.

Au fur et à mesure de l'accroissement de la vitesse de rotation des pales, le ressort se comprime et la translation de la pale engendre une rotation de plus en plus prononcée de celle-ci. Le tarage des ressorts et la géométrie des rainures sont calculés pour obtenir les variations suivantes du calage : démarrage :26°; de 60 à 150 tr/mn :6°; l'angle de calage croît ensuite, au-dessus de 150 tr/mn, jusqu'à un angle de 80° aboutissant à la mise en drapeau.

L'arbre horizontal transmet le mouvement à un multiplicateur qui entraîne la génératrice. Les liaisons entre les différents organes tournants sont réalisées par des manchons brevetés à aiguilles caoutchouc qui filtrent les vibrations et acceptent un éventuel désalignement ou écart angulaire. Un frein pneumatique, qui peut être asservi avec commande à distance, permet de stopper l'ensemble tournant en 20 secondes, en cas de tempête ou d'intervention.



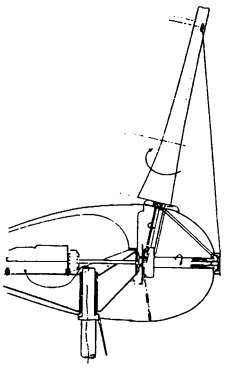
Système de régulation UNICUM par calage variable des pales.

1. Vue d'ensemble du système - La force centrifuge "tire" la pale vers l'extérieur; le ressort se comprime et le doigt de guidage contraint l'ensemble à un mouvement de rotation.
2. Vue perspective montrant l'agencement de l'extrémité du demi-arbre de suspension pour sa liaison au bras rotatif porte-pales.
3. Vue en coupe longitudinale montrant l'emplacement du doigt de guidage à la vitesse nominale de rotation.

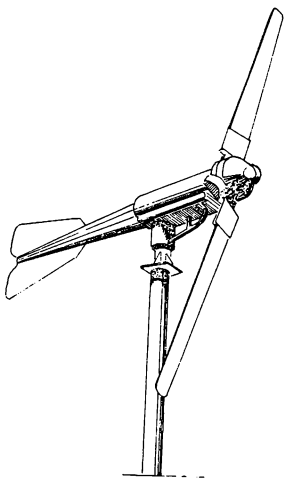
Aérogénérateur CARRE. - Monsieur CARRE, artisan mécanicien, a mis au point un aérogénérateur à pales vrillées en alliage d'aluminium. L'aéromoteur comporte 3 pales d'un diamètre de 8 m, de profil NACA 23012. La puissance nominale est de 10 kW par vent de 9 m/s, la vitesse de rotation étant de 90 tr/mn.

Les pales ont une largeur plus importante en pied qu'à leur extrémité et sont inclinées par rapport au plan de rotation. L'axe de pivotement de chaque pale est placé au quart avant du profil, la masse arrière étant donc plus importante que celle avant, par rapport à cet axe. Lorsque le rotor tourne, la force centrifuge tend à la faire pivoter autour de cet axe et les pales s'auto-régulent, tendant à se mettre en drapeau.

Un dispositif avec l'axe de pivotement non parallèle à l'axe de la pale a été étudié par MORIYA et TOMASAWA (1961). La rotation des pales autour de l'axe de pivotement résulte à la fois du moment dû à la force aérodynamique, pour une faible part, et au moment dû à la force centrifuge.



Aérogénérateur CARRE -Pales vrillées auto-régulantes



Aérogénérateur ENAG Régulation par masselotes centrifuges.

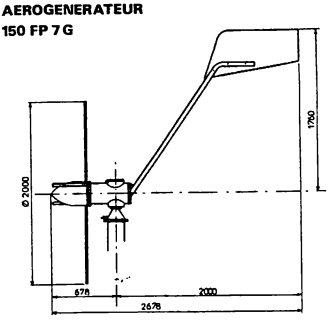
Aérogénérateurs ENAG. - La société ENAG fabrique des éoliennes depuis une quarantaine d'années ainsi que des moteurs électriques. Des aréogénérateurs sont commercialisés comportant des pales en alliage d'aluminium à calage variable et régulation par mise en drapeau. Le système de régulation comporte des masselottes qui s'écartent sous l'effet de la force centrifuge; le pivotement du bras sur lequel est fixé chaque masselotte entraîne la variation de calage de la pale. La mise en drapeau se fait progressivement; un ressort ramène la pale vers sa position de démarrage lorsque la vitesse de rotation diminue.

3. Régulation par diminution du calage. - La diminution de l'angle de calage permet d'atteindre l'angle d'incidence correspondant au décrochage aérodynamique. On peut obtenir de grandes variations de la finesse pour de faibles variations de l'angle de calage mais la corde des pales se trouve placée face à la direction des vents forts ce qui entraîne des charges importantes sur les pales et leur pied de fixation.

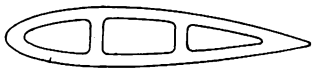
Aérogénérateurs AEROWATT. - (Brevet français n° 1 553 046 du 28.11.1967. Brevet n° 2 139 649 du 28.05.1971 et brevet n° 2 355 179 du 16.06.1976).

La société AEROWATT est bien connue pour ses aérogénérateurs qui équipent les phares et balises. Toute une gamme de machines de petites et moyennes puissances sont fabriquées par cette société. Dans la série "G" on a des machines dont le diamètre s'échelonne de 1,34 m à 9,2 m. Leur système de régulation est identique, par diminution de l'angle de calage, et leur positionnement par rapport au vent s'effectue grâce à une dérive placée hors du sillage de l'hélice. Deux types de supports, auto-basculants et auto-porteurs, sont proposés.

L'hélice comporte deux pales, à profil constant, réalisées en alliage d'aluminium filé à la presse et renforcées par des nervures longitudinales. Chaque pale est fixée sur le pied de pale correspondant, après interposition de matériau plastique. Chaque pied de pale est porté par un axe qui en permet le pivotement (variation de l'angle de calage) et est relié par une tige de régulation aux butées de démarrage. Le moyeu qui porte les axes de pied de pale, les tiges et les ressorts de régulation, est abrité sous une ogive en alliage d'aluminium comportant un joint d'étanchéité.



Aérogénérateur AEROWATT



Profilé en alliage d'aluminium

Pale AEROWATT

REGULATION DE LA VITESSE DE ROTATION. - Pour obtenir un couple de démarrage élevé, les pales ont un calage important, de l'ordre de 20°, lorsque la machine est arrêtée. Ceci est obtenu par la poussée exercée par les ressorts de démarrage sur les butées de démarrage, à partir du plateau de régulation considéré alors comme fixe. Les tiges de régulation, articulées sur les butées de démarrage, et sur les pieds de pales, obligent les pales à rester au calage de démarrage.

Sous l'effet du vent, lorsqu'il dépasse la vitesse de démarrage, l'hélice commence à tourner. Le tenseur d'inertie des pales et organes associés (barres de régulation, pieds de pales) est tel qu'une composante de la force centrifuge exerce une force dans le sens de la réduction du calage et comprime donc les ressorts de démarrage. La raideur des ressorts de démarrage est choisie de telle sorte qu'ils soient complètement comprimés lorsque la vitesse de rotation de la machine atteint le cinquième de sa vitesse nominale.

Lorsque les ressorts de démarrage sont complètement comprimés, les butées de démarrage viennent sur le plateau de régulation et les pales sont alors à leur calage optimal, c'est-à-dire au calage correspondant à l'angle d'incidence i_M de rendement optimal (facteur de conversion maximum). Dans la gamme des vitesses de rotation allant de $0{,}2N_n$ à N_n ,vitesse de rotation nominale, le calage des pales reste fixe.

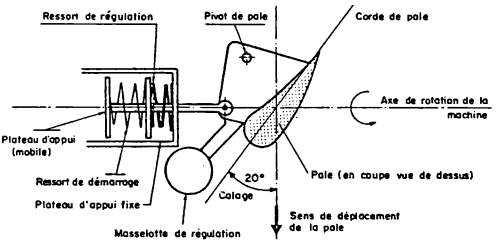
Lorsque la vitesse du vent atteint la valeur nominale V_n , la vitesse de rotation de l'hélice atteint la valeur N_n . Lorsque V est supérieur à V_n , l'hélice a tendance à tourner plus vite et la composante de la force centrifuge appliquée au tenseur d'inertie des pales devient supérieure à la force de précontrainte du ressort de régulation qui est déterminée par le réglage des tiges de précontrainte.

Le ressort de régulation se comprime alors sous l'effet de cette composante; ce faisant, les pales tourillonnent sur leur axe dans un sens tel que l'angle d'incidence dépasse la valeur i_M et, en augmentant, atteigne des valeurs correspondant au décrochage aérodynamique.Il y a alors diminution de la vitesse de rotation de l'hélice.

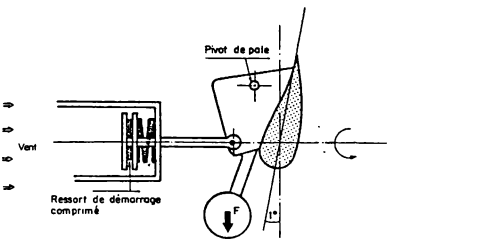
Régulation

AEROWATT

(d'après P.LECLERE
E.D.F.)



Machine à l'arrêt



Machine en rotation au calage optimal

La raideur du ressort de régulation est calculée de telle sorte que la plage de variation de la vitesse de rotation soit très faible, de l'ordre de 5%, pour une très grande plage de variation de la vitesse du vent : de V_n à 60 m/s.

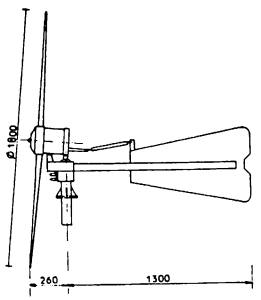
AEROMOTEUR DE L'ILE D'OUESSANT. - A titre d'exemple, nous donnons les valeurs qui ont été retenues pour la régulation de l'aérogénérateur AEROWATT de l'île d'Ouessant qui est décrit au chapitre consacré à la production d'électricité.

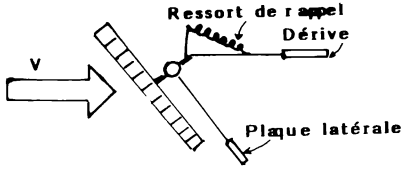
Les pales ont un angle de calage variable de 20° à -15°. Le démarrage a lieu pour un vent d'environ 4 m/s. Le calage des pales passe de 20° à 1° par compression du ressort de démarrage. Le calage optimal de 1° est obtenu à 26 tr/mn et l'hélice accélère à vide jusqu'à 77 tr/mn. Dans le cas d'une marche à vide découplée du réseau, la vitesse maximale atteinte est de 94 tr/mn. Un freinage commandé est réalisé à l'aide de vérins pneumatiques qui amènent l'hélice au calage de -15°. Pour cet angle de calage, le couple exercé par le rotor devient résistant et l'aéromoteur ralentit et stoppe en une dizaine de tours.

4. Régulation par changement d'orientation du plan de rotation des pales.

MISE EN POSITION HORIZONTALE. - Aérogénérateur ENGAG . - Un petit aérogénérateur de 200 watts utilise le principe de la régulation par relevage de l'ensemble hélice-générateur sous la poussée axiale du vent. Un ressort ramène l'ensemble de la position horizontale à la verticale lorsque le vent faiblit.

Aérogénérateur EOLEC. - Une éolienne utilisant deux pales très étroites, formant un rotor de 7,60 m de diamètre, est fabriqué par la société EOLEC. La régulation s'effectue en inclinant progressivement le plan de rotation des pales de la verticale à l'horizontale. Le rotor est régulé à 180 tr/mn et développe une puissance de 6 kW par vent de 8,5 m/s, le plan de rotation étant alors perpendicualire à la direction du vent. L'asservissement se fait à l'aide d'un moteur commandé par une mesure anémométrique de la vitesse du vent.





Régulation par changement d'orientation du plan des pales.

Eolienne ENAG - 500 watts - Régulation par relevage sous la poussée du vent.

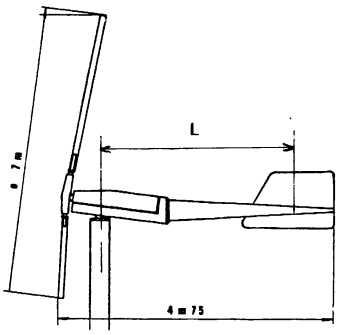
Eolienne multipale avec plaque latérale solidaire de la roue multipale.

MISE EN POSITION VERTICALE PARALLELEMENT AU VENT. - Cette technique est celle qui est souvent adoptée pour les éoliennes lentes multipales. Le plan de rotation des pales fait progressivement un angle de plus en plus aigu avec la direction du vent jusqu'à se mettre parallèle lorsque le vent est très fort.

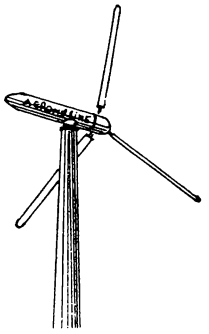
Une plaque latérale, solidaire de la roue multipale, subit l'action du vent et modifie plus ou moins la direction du plan de rotation lorsque le vent augmente. Un ressort de rappel ramène les pales face au vent lorsque sa vitesse diminue.

5. Autres modes de régulation. - De nombreux systèmes de régulation ont été inventés et expérimentés; certains sont utilisés sur des modèles commerciaux mais il semble que, sauf pour de petits modèles, la régulation par variation de calage s'impose peu à peu.

Citons, parmi les modèles commercialisés, les aérogénérateurs WINCO qui utilisent un frein aérodynamique qui s'ouvre automatiquement sous l'action de la force centrifuge et maintient la vitesse nominale constante.



Aérogénérateur UNICUM à Dérive



Aérogénérateur AEROTURBINE auto-orientable

IV. - LES SYSTEMES D'ORIENTATION.

1. Influences du système d'orientation. - Les éoliennes à axe horizontal doivent avoir le plan de rotation des pales constamment perpendiculaire à la direction du vent pour optimiser l'énergie produite. L ors des changements brusques de direction du vent, les variations d'orientation des moteurs éoliens engendrent des efforts très importants sur les éléments qui les composent. Plus les changements d'orientation seront rapides, plus les contraintes seront fortes et néfastes.

Un bon système d'orientation doit donc réaliser un compromis entre la nécessité de maintenir le plan de rotation normalement à la direction du vent et d'éviter des variations trop rapides d'orientation. La surface et la position de l'empennage doivent donc être déterminées de façon à trouver un bon compromis.

2. L'auto-orientation. - Les pales sont situées à l'aval de la nacelle, par rapport au sens du vent. La poussée sur les pales crée un couple tendant à orienter automatiquement l'éolienne dans le lit du vent. Cette technique est simple et efficace; les perturbations dues au pylône semblent être limitées si la distance entre le plan de rotation des pales et le pylône est suffisante. Un carénage du pylône est nécessaire et minimise ces perturbations.

C'est une technique qui a fait ses preuves pour de grands aérogénérateurs tels que ceux construits pour le compte d'EDF (voir les aérogénérateurs BEST-ROMANI et NEYRPIC au chapitre consacré à la production d'électricité).

3. Orientation par dérive. - Cette technique est la plus utilisée pour les petites machines, tant pour les éoliennes lentes que rapides. Elle permet aux pales de tourner face au vent. Deux solutions sont adoptées par les constructeurs : placer une dérive symétrique dans l'axe de rotation des pales ou au-dessus de l'éolienne, en dehors du sillage des pales. Les solutions intermédiaires sont néfastes car l'empennage est alors soumis aux turbulences créées par les pales.

Dérive dans l'axe de rotation. - Pour un prototype donné, la surface de l'empennage et sa distance par rapport à l'axe d'orientation sont déterminées expérimenalement car la répartition des masses varie d'un modèle à l'autre. En pratique, la distance du centre de la dérive à l'axe d'orientation est de l'ordre de 0,6D, où D est le diamètre du rotor.

Soit d la distance entre l'axe d'orientation et le plan de rotation des pales, S la surface balayée par les pales; la surface s de la dérive est alors donnée par

-pour les éoliennes rapides : $s = 0{,}16\ S\ d\ /\ L$

-pour les éoliennes lentes multipales : $s = 0{,}40\ S\ d\ /\ L$

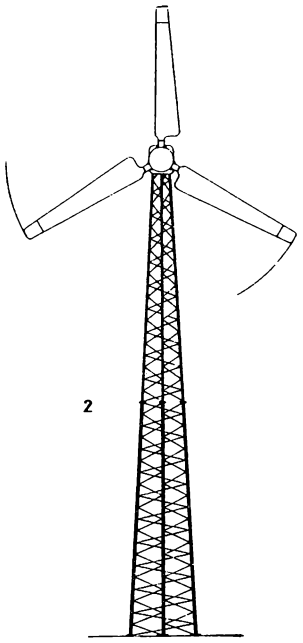
où L est la distance du centre de la dérive à l'axe d'orientation.

Dérive AEROWATT. - Afin de placer la dérive hors du sillage de l'hélice, la société AEROWATT équipe ses aérogénérateurs d'un empennage porté par une poutrelle montant obliquement. L'empennage se trouve alors à une hauteur supérieure à celle balayée par le rotor.

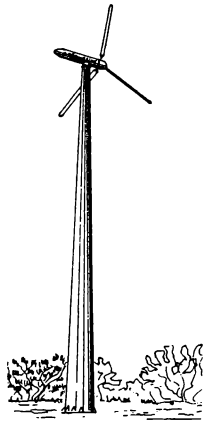
Afin de réduire les vitesses angulaires d'orientation, un gouvernail comportant un volet mobile, par rapport à la poutrelle d'attache, est monté sur certaines machines. (Brevet français n° 76 39193 du 27.12.1976). Dans un forme de réalisation le volet est articulé à son support, en l'occurence la poutrelle, par une charnière élastique, de préférence en élastomère. Les aréogénérateurs de la série UM 70 sont munis d'un tel safran mobile qui assure une limitation du couple d'orientation avec amortissement.

4. Orientation commandée. - Dans ces systèmes, une girouette détermine la direction du vent et envoie un signal à un moteur assurant l'orientation. L'aérogénérateur EOLEC s'oriente ainsi, à l'aide d'une girouette qui établit, quand la direction du vent change, un contact électrique mettant en marche un motoréducteur qui oriente la machine jusqu'au positionnement face au vent. Ce système limite la rotation à un seul tour grâce à une butée. Ceci permet l'emploi de cables électriques, pour la génératrice, évitant les contacts tournants.

De grands aérogénérateurs comportent des systèmes d'orientation assistée, en fonction de divers paramètres, et gérés par ordinateur.



2



1

Pylônes auto-porteurs

1. Pylône AEROTURBINE en tôle pliée auto-basculant à vérin hydraulique.
2. Pylône en treillis métallique WIND-MATIC (Danemark) -Aérogénérateur de 50 kW.

V. - LES PYLONES ET LES FONDATIONS.

Un moteur éolien doit être situé à une hauteur importante à la fois pour bénéficier de l'augmentation d'énergie éolienne avec l'altitude et pour échapper aux turbulences créées par les obstacles environnants. Un compromis devra être trouvé entre le prix de revient du pylône et le prix de l'énergie supplémentaire récupérée lorsque l'on s'élève au-dessus du sol.

Ne faudrait-il pas utiliser des structures porteuses déjà existantes ou concevoir des "pylônes" utilisant des constructions destinées à d'autres usages. A titre d'exemples, on peut recenser dans ce but : les pylônes EDF de transport de l'électricité qui pourraient être conçus pour supporter des éoliennes; les châteaux d'eau; les silos; les bâtiments de toute nature; etc.

Les pylônes doivent être calculés pour résister au moment dû à la traînée de l'éolienne par les vents les plus forts et ne pas avoir de fréquences propres proches de celles de l'éolienne.

1. Les pylônes auto-porteurs. - Les supports auto-porteurs sont en treillis métallique, en béton ou formés de tubes métalliques.

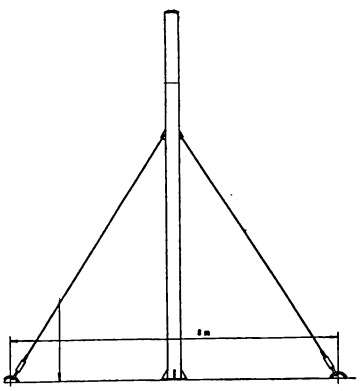
Les treillis métalliques ont une traînée importante ce qui fait déconseiller leur utilisation pour les éoliennes auto-orientables tournant sous le vent du pylône. Ce sont des supports assez peu esthétiques et dont l'entretien est difficile.

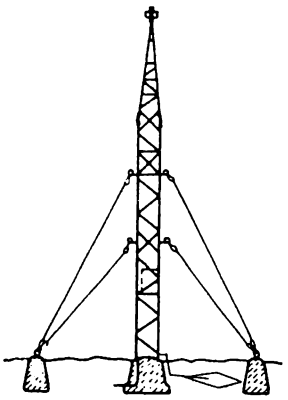
Les pylônes en béton sont surtout utilisés pour les grands aérogénérateurs. Cette technique pourrait s'appliquer aux supports d'aérogénérateurs de petites dimensions en étudiant une technique de coulage en continu avec coffrage glissant.

Pour ces deux premiers types de support, l'entretien de l'éolienne se fera en tête de pylône, ce qui ne facilite pas l'opération.

Les supports tubulaires, cylindriques ou à section polygonale, sont moins répandus mais ont une esthétique intéressante ce qui peut être un facteur important d'intégration. Si l'on adjoint un système de vérin hydraulique en pied de pylône, ceci permet leur basculement et l'entretien au sol. Un tel support autoporteur basculant de 15 m de haut, est proposé par la société AEROTURBINE.

2. Les pylônes haubannés. - Les supports haubannés, formés d'éléments tubulaires fixés entre eux par des brides de liaison boulonnées, sont moins coûteux que les supports auto-poteurs mais d'une "silhouette" moins aérodynamique. Des haubans en acier inoxydable sont à préférer.





Pylônes haubannés

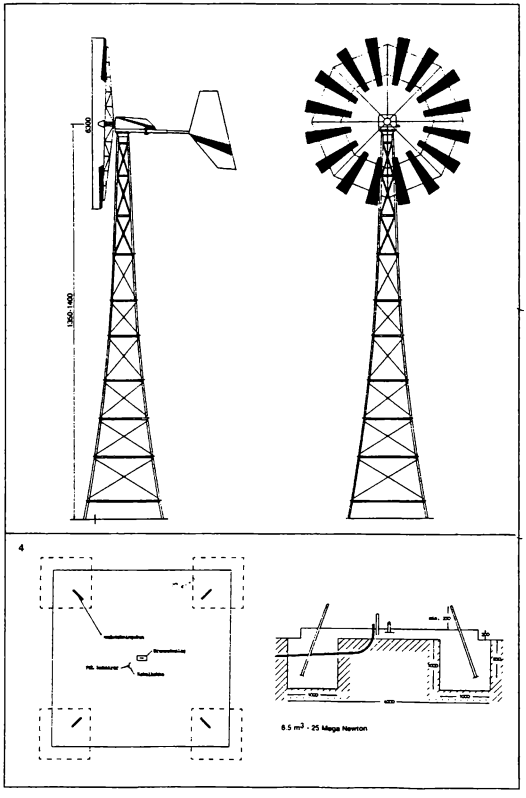
Pylône UNICUM - Tube acier - Elingues inoxydables - extrémités serties -tendeurs à vis- charnière de levage.

Pylône aiguille en treillis (Documentation ELEKTRO)

Des pylônes minces, en treillis métalliques, peuvent également être utilisés avec un haubannage qui peut être à plusieurs nappes.

Les pylônes haubannés peuvent basculer, à l'aide des haubans, et permettent un entretien au sol. Le réglage de la tension des haubans se fait à l'aide de ridoirs. Afin d'assurer un basculement correct, les haubans latéraux doivent se trouver dans l'alignement de l'axe de pivotement du pied du pylône et ils serviront à guider le pylône lors de sa descente.

3. Les fondations. - Quel que soit le type de pylône choisi, un massif important en béton doit être coulé; des tirants métalliques scellés dans la masse de béton doivent être prévus pour la fixation du support. Dans le cas de pylônes haubannés, des ancrages importants doivent également être coulés dans le sol.



Eolienne WIND-POWER (Danemark)

Diamètre du rotor : 6,30m - Fondations : 4m x 4m -6,5m³-

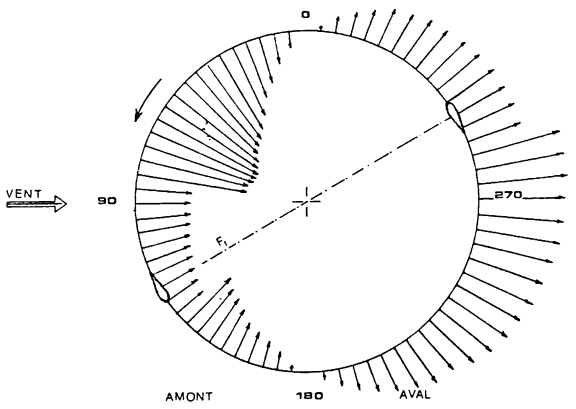
CHAPITRE VII
Éoliennes à axe vertical

I. - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'AXE VERTICAL.

Les éoliennes à axe vertical furent sans doute les premières machines utilisant le vent.Durant plusieurs millénaires, seules les machines à traînée existèrent et ce n'est que récemment, en 1931, qu'un moteur éolien à portance fut inventé par Darrieus, utilisant les données de l'aérodynamique moderne pour la conception d'une éolienne à axe vertical.

L'utilisation d'un axe vertical semble, en principe, séduisant puisque la symétrie de révolution du système le rend indépendant de la direction du vent. De plus, la transmission de l'énergie récupérée peut se faire directement au sol, sans renvois d'angle pour une transmission mécanique, ni contact tournant pour une génératrice.La maintenance des mécanismes de conversion énergétique et éventuellement de freinage, se trouve également facilitée par suite de leur proximité du sol.

Cependant, par suite de la direction privilégiée du vent, à tout instant, la symétrie du système n'est qu'apparente. Les charges aérodynamiques subies par les pales sont asymétriques, les pales remontant le vent subissant des efforts différents de celles qui suivent son sens de déplacement. Ces charges sont évidemment cycliques, ce qui peut engendrer des phénomènes de fatigue et des vibrations. Pour les machines à traînée, ces effets seront en général peu dommageables mais il n'en est pas de même pour des éoliennes à portance dont les vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées.



Eolienne Darrieus - Effort aérodynamique radial -

(R. COMOLET -1982-)

Parmi les machines à traînée, on peut distinguer :

-les éoliennes à traînée différentielle dont la simplicité de fabrication peut être recherchée, assurant une bonne fiabilité et une grande robustesse, lorsque de petites puissances sont nécessaires. C'est le cas des anémomètres à coupelles et des éoliennes Savonius dont quelques modèles sont commercialisés.

-les éoliennes à écran, ce dernier entraînant une amélioration des performances des panémones. Un petit modèle est commercialisé, par exemple, par la société suisse Elektro.

-divers systèmes à clapets battants, à pales tournantes,etc, dont aucun modèle ne s'est développé de nos jours.

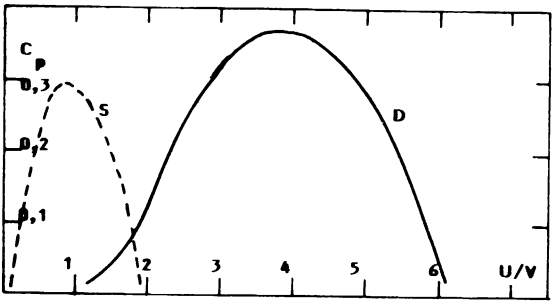
Parmi les machines à portance, on distingue :

-les éoliennes Darrieus à aubages fixes. Les pales ont des profils aérodynamiques et diverses formes ont conduit à de nombreuses expérimentations ainsi qu'à la commercialisation de quelques modèles. Ces éoliennes ne sont pas auto-démarrantes et nécessitent une implantation sur des sites ayant un vent moyen important.

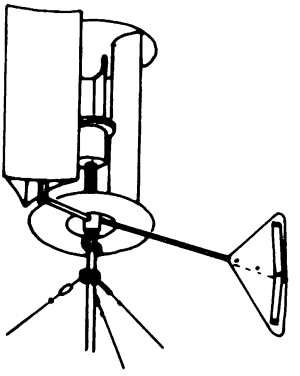
-les machines à aubes mobiles de type Darrieus. ces machines sont auto-démarrantes, ont des performances intéressantes pour des vents moyens peu élevés mais sont plus complexes et fragiles que les précédentes. Quelques modèles sont diffusés par des constructeurs.

-les machines Arnbak à aubes fixes. Ces éoliennes ont des aubages de grande surface, par rapport aux machines Darrieus, ce qui limite peut-être leur intérêt.

Sans être exhaustive, cette classification couvre actuellement la totalité des types d'éoliennes à axe vertical qui semblent appelées à quelque développement.



Facteur de conversion d'éoliennes à axe vertical
S : éolienne Savonius - D: éolienne Darrieus (Vawian)



Panémone à écran mobile
(Elektro)

II.- LES EOLIENNES A TRAINEE

1. Eoliennes Savonius. - Les éoliennes du type Savonius sont des machines à traînée différentielle inspirées des antiques panémones. Ces dernières étaient munies d'aubes formées par plusieurs demi-cylindres ou portions de cylindres. La rotation des pales est due au fait que le vent exerce sur la partie concave du cylindre une poussée plus forte que celle exercée sur la partie convexe.Cette dissymétrie des traînées, sur l'ensemble des pales, engendre l'apparition d'un couple moteur.

L'invention faite par le finlandais Savonius, en 1924, consiste à laisser un certain intervalle central entre les pales. Ceci entraîne l'apparition d'une force de traînée supplémentaire due aux filets d'air qui passent par cet interstice central et sont déviés vers la pale qui "remonte" le vent.

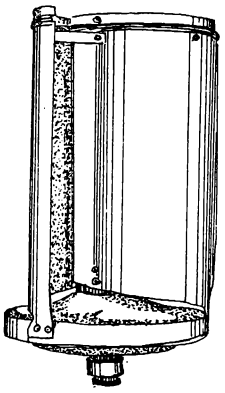
L'éolienne Savonius a fait l'objet de nombreuses expérimentations en variant le nombre de pales ainsi que leur disposition respective.

Pour un modèle bipale, le coefficient de conversion maximum est obtenu pour une pale demi-cylindrique de diamètre d et un écartement e, tel que le rapport e/d = 1/6. Le coefficient de puissance maximum obtenu est alors égal à 0,3 pour une valeur correspondante de 0,9 du paramètre de fonctionnement. La puissance maximale s'exprime par :

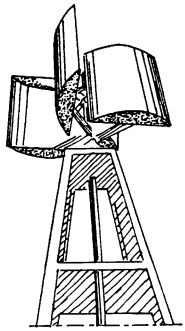
$$P_m = 0{,}18\ S\ V^3$$

où S est la surface balayée par les pales. Pour une éolienne de hauteur h, d'interstice e,cette surface est : S = h (2d-e).

Diverses réalisations ont été expérimentée avec des éoliennes Savonius bipales, superposées l'une sur l'autre, les pales d'un étage étant décalées de 90° par rapport à celles de l'étage inférieur.La puissance totale de l'éolienne ainsi constituée est la somme des puissances de chacun des Savonius. Cette disposition assure un meilleur démarrage car le couple d'un Savonius bipale présente des valeurs différentes selon la position d'arrêt par rapport à la direction du vent.



Eolienne Savonius tripale (PROENGIN)



Eolienne Savonius à 4 pales (SCHNEIDER)

2. Variantes de type Savonius. - Afin de pallier aux variations cycliques du couple des éoliennes Savonius bipales, un modèle comportant des pales hélicoïdales a été réalisé par la société canadienne Hélius, une torsion de 180° de chaque pale permettrait, selon le constructeur, un couple constant. Un petit modèle à pales métalliques est proposé. D'autres essais portant sur la réalisations de pales de grandes dimensions en matériaux souples ont été entrepris.

Des modèles à trois ou quatre pales mobiles ont été expérimentées par J. SCHNEIDER (1979). Les pales sont des portions de cylindres et sont articulées de façon à obtenir une auto-régulation. Lorsque la vitesse augmente, la force centrifuge tend à diminuer la surface motrice et l'ensemble des pales se referment pour former un cylindre.

Deux modèles commercialisés par la société PROENGIN consistent en petites éoliennes tripales de type Savonius. Ces éoliennes sont spécialement conçues pour la navigation de plaisance et comportent des pales en alliage résistant à la corrosion. Les pales ont une forme incurvées, non circulaire, et sont fixées sur le rotor d'un alternateur à fer tournant. Les dimensions existantes sont les suivantes :
Modèle I : Diamètre : 20 cm; hauteur : 65 cm; masse : 4,2 kg.
Modèle II: Diamètre : 20 cm; hauteur : 31 cm; masse : 2,7 kg.

Près de 2000 éoliennes de ce type équipent actuellement des bateaux de plaisance. Des utilisations assez diverses ont fait appel aux modèles PROENGIN: maintien de la charge électrique de batteries pour des caravanes ou des résidences secondaires isolées; éclairage de serres dans des zones quasi-désertiques où les récoltes sont effectuées la nuit; relais radio; balisage lumineux; etc. Le niveau de fiabilité est excellent ainsi que le montre le taux de panne, inférieur à deux pour mille, ces pannes étant d'origine électrique.

3. Eoliennes à écran. - On peut placer un écran devant les aubages qui "remontent" le vent, afin de supprimer la poussée qui s'oppose à la rotation. Des moulins persans , de grandes dimensions, étaient déjà équipés d'un tel écran fixe, la panémone étant fixée dans une tour de plusieurs mètres de diamètre.

Un petit modèle à écran orientable est construit par la société suisse ELEKTRO C'est une panémone dont l'écran est orienté par une dérive. Cet écran cache à la fois la partie convexe, résistante, des pales et dévie le vent vers la partie concave, active, des pales.

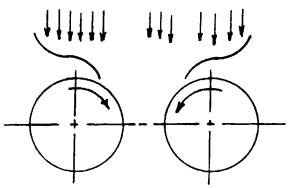
Une étude portant sur le couplage de deux rotors tournant en sens inverse avec un écran améliorant le facteur de conversion, a été réalisée à l'Université de Sherbrooke, au Québec. Les deux rotors sont montés sur un cadre permettant l'orientation de l'ensemble face au vent.

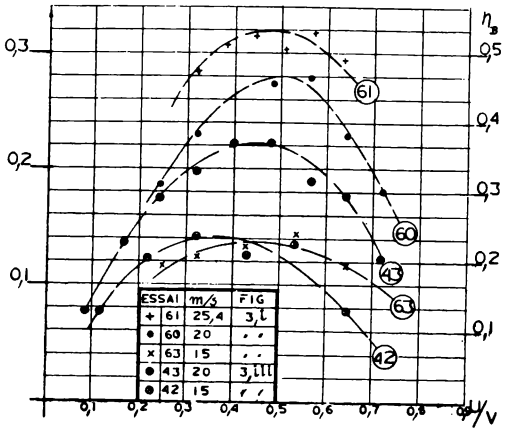
Les rotors comportent chacun 24 aubes. Un écran porté par le cadre et pivotant avec l'ensemble, concentre l'écoulement du vent sur les aubes actives et masque les aubes à contre-courant.Les rotors tournent en sens inverse l'un de l'autre. Le mouvement est transmis à un arbre central par courroies. La symétrie de l'écoulement, l'absence d'effet gyroscopique et la position du centre de traînée, sous le vent de l'axe de pivotement, font que l'ensemble s'oriente de lui-même.

Le rendement s'accroît par le rapprochement des rotors avec un maximum pour E/D = 1,4; E étant l'écart entre les axes des rotors et D le diamètre de ces derniers. Les facteurs de conversion présentent un maximum, variant avec l'écartement des rotors, pour un paramètre de fonctionnement égal à 0,5.

Double panémone à écran

Université de Sherbrooke-Québec-



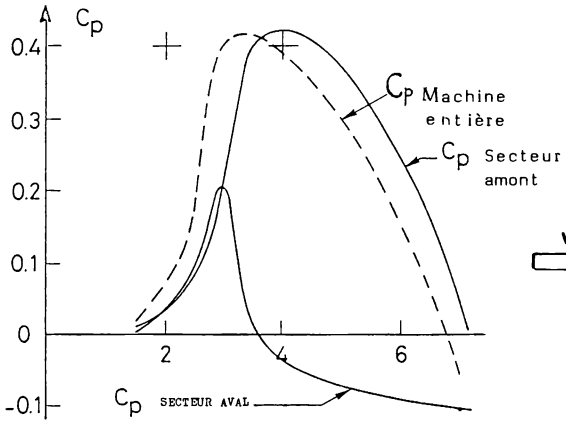


III. - LES EOLIENNES DARRIEUS A AUBES FIXES.

1. Principe de fonctionnement. - Les éoliennes à axes vertical n'ont bénéficié que tardivement des progrès de l'aérodynamique, puisque c'est seulement en 1931 que fut conçue la première éolienne à portance, à axe vertical, par le français Darrieus. Ceci explique peut-être la pré-éminence actuelle des éoliennes à axe horizontal.

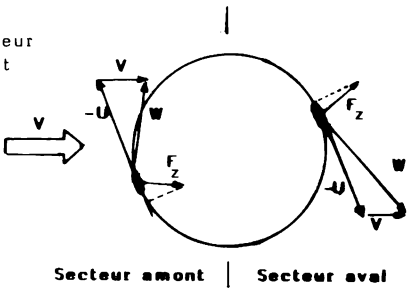
Les éoliennes Darrieus sont constituées de pales à profil aérodynamique de formes diverses. Les profils utilisés sont généralement biconvexes bien que des profils cambrés aient été expérimentés récemment en vue de permettre l'auto-démarrage de ces éoliennes. Les modèles classiques sont à deux ou trois pales, reliées rigidement entre elles. Par suite, lorsque l'éolienne tourne, l'angle d'incidence des pales varie de manière cyclique.

Le schéma de l'action du vent relatif **W** sur les pales d'une éolienne Darrieus, permet de comprendre aisément que la force de portance appliquée à chaque pale crée un couple moteur, sauf dans une partie du secteur aval où le couple peut devenir résistant.



Facteurs de conversion d'éolienne Darrieus

(R.COMOLET -1982)



Rotor Darrieus

2. Etudes théoriques. - Nous donnons essentiellement une bibliographie des études théoriques qui ont été effectuées sur l'éolienne Darrieus, reprenant l'étude critique qui en a été faite par R. COMOLET (1982).

Plusieurs théories ont été proposées et peuvent être divisées en deux catégories:

Les théories de quantité de mouvement. -Principalement étudiées au Canada, d'abord par R.J. TEMPLIN (1974), qui a proposé le schéma d'un tube de courant unique traversant le rotor Darrieus. Le modèle s'avère peu précis car les profils ont des comportements très différents selon la position qu'ils occupent dans un tel tube de courant.

J.N. STRICKLAND (1976) a ensuite proposé une théorie de quantité de mouvement avec une multitude de tubes de courant disposés en parallèle, ce qui est déjà plus proche de la réalité et permet de connaître les charges des aubes, tube de courant par tube de courant. Le défaut de ce modèle, est qu'il suppose que la variation de la vitesse de l'air à travers le secteur amont n'induit pas de variation de section des tubes de courant. Il suppose également que le secteur aval apporte la même contribution à la conversion d'énergie que le secteur amont.

I. PARASCHIVOIU (1981) a repris le schéma proposé par BERTIN (1976-1978) et par LAPIN (1975) dans un modèle assimilant l'éolienne à deux disques d'impulsion en tandem dans chaque tube de courant, ce modèle est appelé "double multitude de courant". Chaque tube de courant est coupé par deux disques d'impulsion à un diamètre l'un de l'autre. C'est un schéma supposant implicitement l'épanouissement du flux d'air mais qui ne dit pas ce que devient le flux qui ne pénètre pas dans le deuxième disque.

Plus récemment, S. READ et D.J. SHARP (1980), ont proposé une méthode de calcul en fluide parfait où les lignes de courant s'épanouissent linéairement à la sortie du rotor.

R.COMOLET (1982) a développé une théorie à tubes multiples, dans un modèle bidimensionnel, qui prend en compte à la fois l'évasement des tubes de courant à la traversée de chaque secteur mais aussi leur déplacement latéral inévitable.

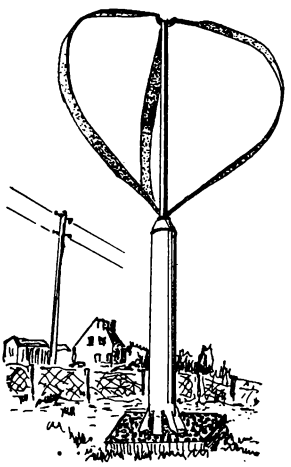
Les théories tourbillonnaires. - La première fut élaborée par O. HOLME (1976) et était basée sur la théorie de la ligne portante, avec sillage figé et nombre infini de pales.Le calcul de la vitesse induite permet de connaître la forme des lignes de courant mais nécessite un temps de calcul relativement long.

J.R. FANUCCI (1975) a ensuite mis au point un modèle de tourbillon libre et répartition de singularités : la pale est remplacée par un ou plusieurs tourbillons liés et le modèle utilise l'écoulement instationnaire et la traînée pour estimer les forces sur les pales soit par intégration des pressions sur le profil soit par le calcul des vitesses induites.

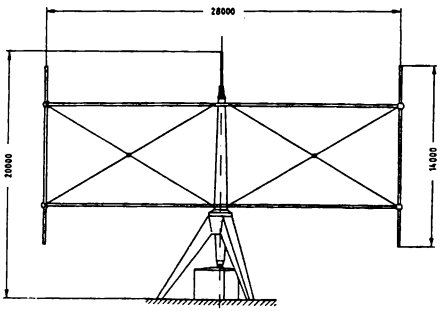
Enfin, J.N. STRICKLA ND (1980) a étendu le modèle de tourbillon libre au domaine tridimensionnel en se basant sur l'hypothèse de la ligne portante pour représenter un élément de pale.

Les performances calculées au moyen de modèles tourbillonnaires sont plutôt plus précises que celles obtenues avec les modèles multitubes mais nécessitent de plus long temps de calcul.

3. Eolienne EOLE 80. - Un seul constructeur français, EOLE 80, propose actuellement sur le marché une éolienne Darrieus. Un premier prototype de 4m de diamètre a été installé dans le Nord en août 1980 et un autre de 5m en 1981. Ce dernier prototype comporte trois pales de profil NACA 0018, courbées selon un "troposkien". C'est la forme que prend naturellement un câble flexible, fixé verticalement à ses extrémités, et animé d'un mouvement tournant, les efforts de tension étant ainsi constamment tangents à la courbe ainsi obtenue.



Eolienne EOLE 80



Eolienne Darrieus bipale VAWIAN

Diamètre : 28m

Pratiquement, le modèle commercialisé comporte des pales formées de deux parties droites de deux mètres et d'une partie circulaire de quatre mètres, les trois parties de chaque pale étant assemblées sur le site.

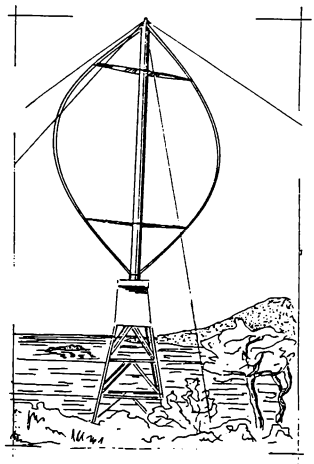
Pour une surface balayée de 16,5 m², la puissance fournie , en watts, est sensiblement donnée par : $P = 3{,}03\ V^3$ dans une plage de vitesses du vent de 5 à 11 m/s. Le facteur de conversion est alors de l'ordre de 0,3. La vitesse maximale obtenue, sans couplage à la génératrice électrique, est de 200 tr/mn pour un vent de 11 m/s. La vitesse maximale est de 110 tr/mn lorsque l'éolienne est couplée à une génértarice de 5 kVA par l'intermédiaire d'un multiplicateur de rapport 15. (les caractéristiques de l'éolienne commercialisée sont décrites dans le chapitre consacré au chauffage éolien).

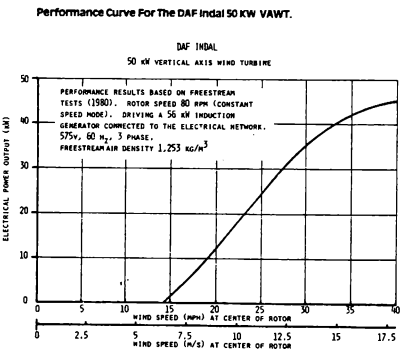
4. Eoliennes D.A.F. - La société Dominion Aluminium Fabricating (D.A.F.), au Canada, est le premier fabricant mondial d'éoliennes Darrieus.

Plusieurs machines de 50 kW de puissance nominale sont installées au Canada et en Australie. La plus grande machine de ce type, d'une puissance de 200 kW, est installée aux Iles de la Madeleine, dans le golfe du Saint-Laurent. Les machines de 50 kW sont en cours de commercialisation.

Un prototype de petite machine Darrieus, couplée à un convertisseur mécano-thermique à huile est en cours d'étude. Les dimensions de la machine sont : hauteur du rotor : 10m; diamètre maximal : 6,5m; hauteur de la tour porteuse : 2,50m; puissance nominale : 10 kW.

Les divers modèles sont des éoliennes bipales, de forme troposkienne. Les pales sont en alliage d'aluminium; elles sont haubannées à l'axe central dans leurs parties supérieure et inférieure.





Eolienne D.A.F. de 50 kW – Ile de Vancouver - Canada - Aéromoteur : hauteur :16,8m Diamètre équatorial : 11,2m - Hauteur totale : 26,4m - Poids : 3600 kg -

5. Eolienne des Iles de la Madeleine. - Cette éolienne canadienne à axe vertical de type Darrieus est la plus grande du Monde de ce type et est installée aux Iles de la Madeleine. Un premier modèle a été installé au printemps 1977 et à la suite de la destruction de celui-ci, un second prototype a été érigé plus récemment. Cette éolienne est le résultat du travail de l'Hydro-Québec, du Conseil National de la Recherche et de la compagnie D.A.F. L'éolienne est raccordée au réseau électrique des Iles de la Madeleine dont l'électricité est produite par une centrale de 39 MW assurée par des groupes diésel.Les vents moyens annuels étant de 8,5 m/s à une hauteur de 10 m, l'endroit est particulièrement favorable pour l'installation d'une éolienne de ce type.

Le moteur éolien. - Le rotor de l'éolienne comprend une colonne verticale de 36,3 m de haut et de 1,5 m de diamètre, en aluminium, sauf les deux cônes aux extrémités qui sont en acier galvanisé. Les pales, de type NACA 0018, ont une corde de 0,61 m et sont incurvées en forme de troposkien avec un rapport hauteur/diamètre de 1,5. Le diamètre équateur est de 24,4m.

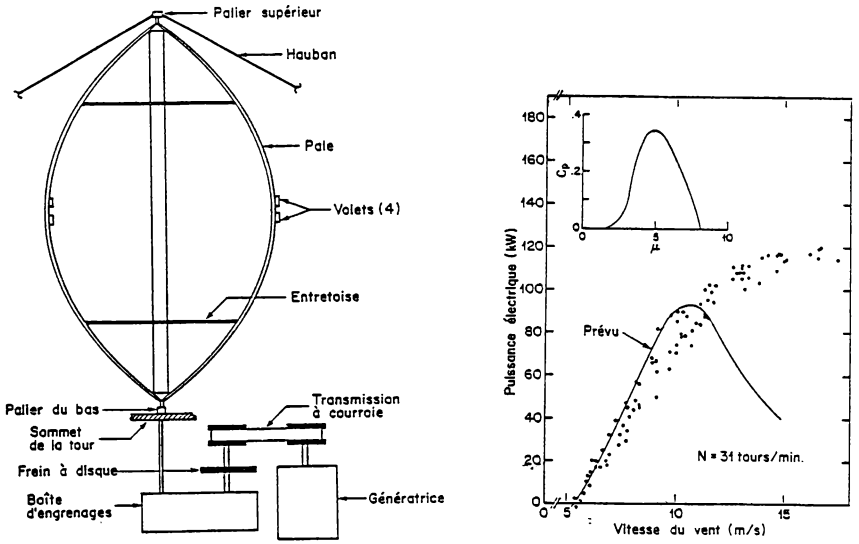
Des entretoises sont placées à 7 m de chaque extrémité du rotor. Elles sont fixées directement aux pales et raccordées à la colonne par des amortisseurs hydrauliques. Chaque pale est équipée de deux volets ou freins aérodynamiques qui ont 0,75 m de corde et 0,91 m de longueur. Les volets ont été conçus de façon à s'ouvrir automatiquement sous l'action de la force centrifuge en cas de survitesse et ainsi empêcher un emballement de l'éolienne.En fonctionnement normal, un mécanisme pneumatique de verrouillage maintient les volets en position fermée.

L'éolienne est ainsi complètement supportée par un palier inférieur qui repose sur le sommet de la tour et par un palier supérieur maintenu en place par quatre haubans de 2,86cm de diamètre, accrochés à des socles de béton. Le palier inférieur est aussi équipé d'un accouplement spécialement conçu pour permettre au rotor de dévier de la verticale.

Le système de transmission mécanique et la génératrice sont enfermés dans une petite chambre en haut de la tour de support de 9,2 m. Le système multiplicateur comprend principalement une boîte à engrenages à double palier avec un rapport de multiplication de 15,73. Un frein à disque à commande pneumatique/hydraulique complète le freinage aérodynamique.

Systèmes électrique et de régulation. - Comme l'éolienne n'est pas autodémarrante, la génératrice est utilisée comme moteur pour le lancement du rotor et jusqu'à ce que ce dernier atteigne une vitesse proche de la vitesse de fonctionnement, au-dessus de laquelle elle fonctionne comme une génératrice. L'éolienne dépend de la charge du réseau pour limiter sa vitesse.

Le système de régulation protège l'éolienne de façon entièrement automatique. En réponse à des signaux déterminés, un circuit logique contrôle les démarrages



Eolienne Darrieus des Iles de la Madeleine - Québec -

et les arrêts de l'éolienne. Par exemple, des signaux de capteurs indiquant une perte de voltage dans la ligne, des vents trop élevés, des vibrations excessives, etc, feront initier la séquence de freinage (déclenchement du disjoncteur principal et celui du démarreur, et enclenchement du système de freinage mécanique). D'autre part, la séquence de démarrage n'est initiée qu'après que le circuit logique ait vérifié la puissance du vent, le voltage de la ligne, etc.Une commande manuelle permet également de lancer ou d'arrêter le rotor à volonté.

Essais et performances. - Les problèmes de vibrations et de résonance sont toujours présents avec les éoliennes. Il s'agit donc d'éviter de les faire fonctionner près de ces conditions. Lors d'un incident, l'éolienne atteignit environ 50 tr/mn avant le déploiement des volets et l'éolienne s'arrêta.Cette excursion indiqua une résonance dans les haubans vers 42 tr/mn au lieu de 55 tr/mn comme prévu. C'est pourquoi la vitesse de rotation a été limitée à 31 tr/mn en attendant de corriger ce problème.

Les mesures des performances de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent, pour un régime de 31 tr/mn, montrent que la puissance est supérieure à celle prévue en fonction des résultats de soufflerie.En régime de plein fonctionnement, on remarque des fluctuations de la puissance de plus ou moins 22%, à deux fois la fréquence de rotation de l'éolienne; ceci est dû aux caractéristiques de ce type d'éolienne.

Ecroulement de l'éolienne et reconstruction. - Après un an environ de fonctionnement, l'éolienne fut détruite. A la suite de travaux, l'éolienne fut découplée du frein mécanique durant une nuit. A la suite du démarrage spontané de l'éolienne durant cette nuit, les volets aérodynamiques de freinage se sont bloqués soudainement

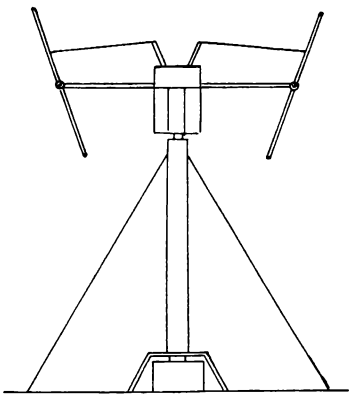
en position fermée après quelques heures de fonctionnement.Les volets étant fermés, l'éolienne s'emballa jusqu'à un régime de 60 à 70 tr/mn selon la vitesse du vent, puis une rafale de vent fit augmenter le régime à 74 tr/mn et l'éolienne atteignit alors un point de résonance mécanique. Un premier hauban toucha les pales et cassa; les trois autres haubans s'enroulèrent autour de l'éolienne qui s'écroula.

L'analyse des faits et des essais n'a révélé aucune faute majeure dans la conception de l'éolienne. Divers éléments furent améliorés et les travaux de reconstruction de l'éolienne furent terminés en 1979.

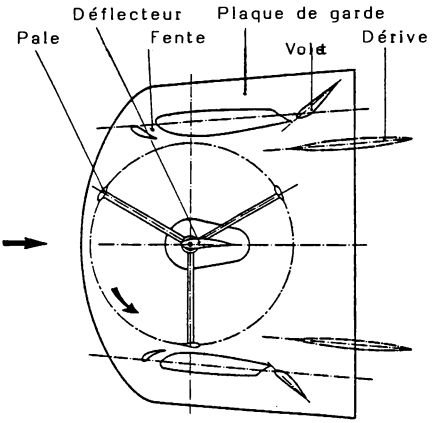
6. Eolienne à géométrie variable. - La société P.I. Specialist Engineers, en Grande-Bretagne, construit et commercialise une éolienne Darrieus à pales droites dont la position peut varier par rapport à la verticale, assurant une régulation de la vitesse de rotation (brevet d'invention N° 76 21612 de P.J. MUSGROVE).

L'augmentation de l'inclinaison des pales, quand la vitesse de rotation augmente, a un double effet. En premier lieu, l'inclinaison de la pale par rapport au vent, réduit la vitesse efficace du vent. En second lieu, la hauteur totale des pales est réduite et par suite, le moment total de rotation est diminué. La vitesse de rotation de l'éolienne augmente plus lentement avec l'augmentation de la vitesse du vent que dans le cas d'une éolienne ayant des pales fixes.

Le modèle proposé est une éolienne tripale de 6 m de diamètre en position cylindrique.Les pales ont 3 m de hauteur et une corde de 0,75 m; elles sont en plastique renforcé de fibres de verre. Les bras de fixation au mat central sont situés au tiers inférieur des pales et le point d'attache est articulé. Des cables assurent un second point d'attache au tiers supérieur. Lorsque la vitesse de rotation augmente, les cables fixés à la partie supérieure des pales inclinent celles-ci vers l'axe de rotation ce qui régule la vitesse. Celle-ci ne peut ainsi dépasser 120 tr/mn.



Eolienne à géométrie variable (MUSGROVE)



Eolienne Darrieus à surfaces passives orientables (Romani)

L'ensemble est monté sur un mât d'acier tubulaire de 20 cm de diamètre et de 7 m de hauteur. Le rotor entraîne un multiplicateur couplé à une génératrice dont la puissance de sortie est de l'ordre de 400 W pour un vent de 5 m/s et atteint 2 kW pour un vent de 10 m/s.

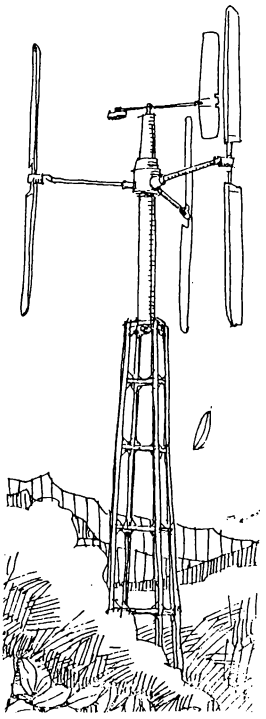
7. Eolienne Darrieus à surfaces passives orientables. - Un brevet déposé par L. ROMANI (1954) préconise l'amélioration du facteur de conversion d'une éolienne Darrieus à l'aide d'un ensemble de surfaces passives orientables, de préférence à un système à aubages mobiles dont il montre les difficultés.

Dans le modèle breveté, l'éolienne est munie de surfaces passives fixes, par rapport à la direction du vent, ce qui implique qu'elles soient montées sur un support orientable par une dérive. La grandeur, la forme et l'emplacement de ces surfaces sont tels que le champ de vitesses induites de l'air qu'elles créent permet d'accroître le rendement des pales en modifiant périodiquement les angles d'incidence sur chaque pale. Dans une forme de réalisation, les surfaces passives fixes sont des surfaces générées par des profils d'aile présentant un coefficient de portance maximum très élevé, avantageusement munies d'un système hypersustentateur.

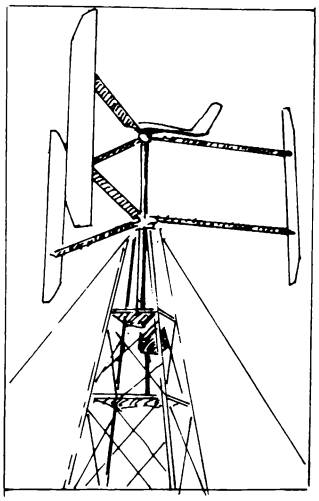
IV. - LES EOLIENNES DARRIEUS A AUBES MOBILES

Par suite de la variation cyclique de l'angle d'incidence des pales d'un rotor Darrieus, il en résulte des changements continuels de la composante utile de la portance. Cette composante devient même négative, à chaque tour, pour une pale donnée, durant un certain temps, et par suite elle freine le couple moteur. Le facteur de conversion de ces machines ne peut donc être optimum que si les pales effectuent un mouvement d'oscillation, d'amplitude déterminé, par rapport à la direction qu'elles suivraient si elles étaient fixées rigidement à l'axe support. Ce mouvement d'oscillation doit avoir la même fréquence que le mouvement de rotation et être déphasé convenablement par rapport à la direction d'écoulement du vent.

1. Cycloturbine "Pinson Energy". - La société américaine PINSON ENERGY commercialise, depuis 1978, un modèle de rotor Darrieus à aubages orientables dénommé "cycloturbine".Le diamètre du rotor est d'environ 4 m et la hauteur des pales de 2,6 m. Les pales sont verticales et leur orientation variable est commandée par un mécanisme guidé par une dérive. L'éolienne est auto-démarrante à partir d'un vent de 8 km/h; elle atteint une puissance de 2 kW pour un vent de 35 km/h et un maximum de 4 kW pour un vent de 48 km/h. L'ensemble est monté sur une tour de 10 m.



Eolienne Darrieus à pales orientables (G.GAL)



"Cycloturbine"

(Pinson Energy Corporation)

2. Eolienne "Gal". - Une éolienne Darrieus à pales orientables a été construite et expérimentée par G. GAL (1979). Les pales sont de type NACA 0012, symétrique, et le mouvement oscillatoire est réalisé par deux mouvements simples superposés:

-un mouvement de tourillonnement permettant à la pale de garder "le nez au vent";

-un mouvement de variation cyclique d'incidence donné par deux joints de cardan simple reliés par un arbre intermédiaire.

Des essais ont été réalisé sur cette éolienne par le C.S.T.B. de Nantes. La fixation centrale des pales rend cette éolienne fragile et il semblerait préférable de prévoir deux points d'attaches comme dans les modèles américains ou suédois.

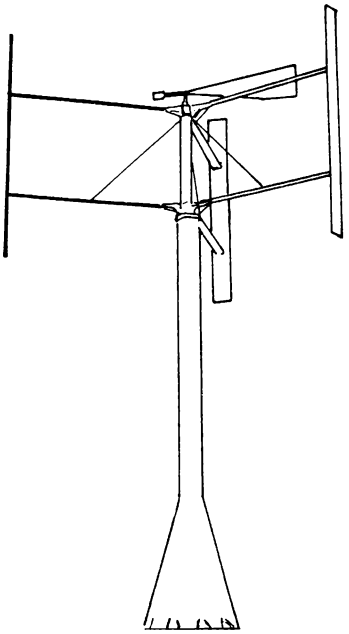
3. Giromill "Dansk Vindkraft Industri". - Un modèle tripale étudié par la société Dansk Vindkraft Industri, au Danemark, est dénommé "giromill". Les dimensions de la machine sont les suivantes :

Hauteur totale : 14,3 m; diamètre du rotor : 9 m; hauteur du rotor : 5,5 m; surface balayée : 49,5 m^2; corde du profil : 0,60 m; nombre de pales : 3; vitesse nominale de rotation : 52 tr/mn.

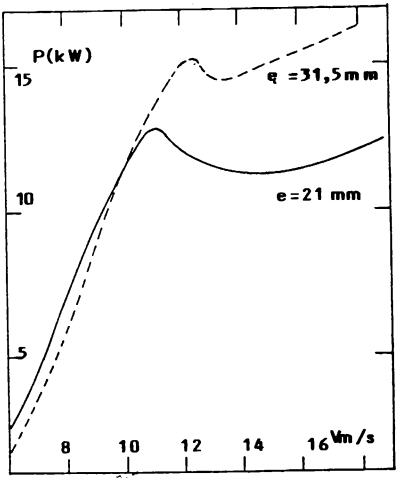
Le moteur éolien est couplé à une génératrice asynchrone de 15 kW. Le pylône porteur est en tube d'acier. Les pales pivotent autour de leur axe vertical de rotation à l'aide d'un mécanisme à excentrique.

La machine a été expérimentée au centre de RISØ qui est le laboratoire officiel d'essais éolien du Danemark. La puissance mesurée est celle fournie aux bornes de la génératrice et la vitesse du vent est mesurée à mi-hauteur des pales, à une distance située à deux fois le diamètre du rotor en avant de l'éolienne, dans la direction du vent.

On peut faire un réglage manuel de l'excentricité, e , de l'éolienne afin de mesurer son influence sur le facteur de conversion Les courbes obtenues montrent une variation de la puissance lorsque l'excentricité varie et le facteur de conversion passe par un maximum de 0,24 pour un vent V = 12 m/s et e = 21 mm.



Eolienne Darrieus à pales orientables
(Dansk Vindkraft Industri)



Courbe de puissance
(éolienne Dansk Vindkraft Industri)

V. - COUPLAGE SAVONIUS-DARRIEUS.

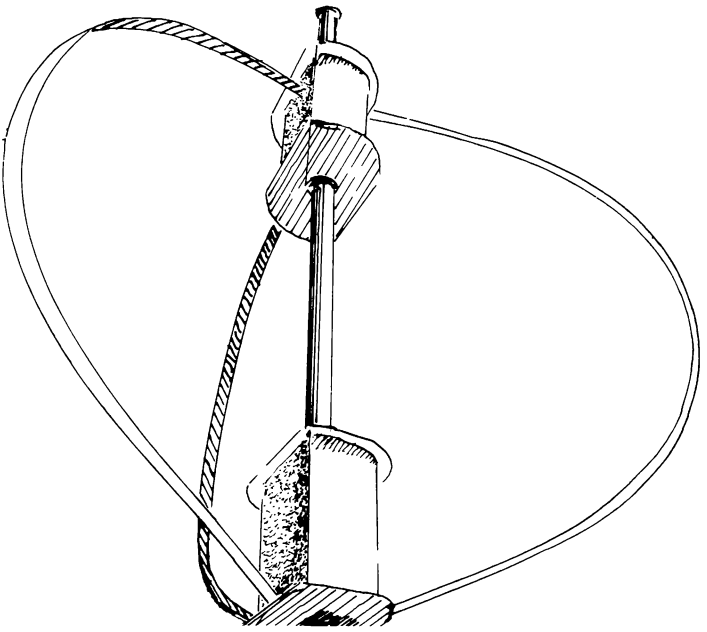
Afin de permettre le démarrage autonome des éoliennes Darrieus, des aubages de type Savonius peuvent être fixés sur le même axe de rotation que les pales Darrieus. Diverses expériences ont été faites en ce sens mais aucune ne semble avoir de prolongements commerciaux.

La société BERTIN a réalisé un aérogénérateur expérimental de type Darrieus comportant un rotor Savonius placé sous le système Darrieus. L'appareil a été installé en septembre 1980 à Pleumeur Bodou afin de procéder aux essais. Un rotor à pales droites a été préféré à un rotor de forme troposkienne. Le rotor Savonius, situé dans le pylône, assure le démarrage de l'éolienne et la limitation du régime de rotation par ouverture de volets aérofreins sous l'action de la force centrifuge.

Les pales du Darrieus sont en matériau composite, formé de nids d'abeille et de carbone, de la résine époxy formant la surface des pales.Le Savonius est en acier inoxydable. La liaison entre les pales et les bras fixés à l'axe de rotation est assurée par un système à rotule, une fixation rigide ayant montré des fissurations rapides au niveau du point d'attache.

Un alternateur de type "poids lourds" a été associé à l'éolienne par l'intermédiaire d'un multiplicateur pour constituer l'aérogénérateur. Ce dernier démarre facilement pour un vent de 2,5 m/s environ; la production électrique commence pour une vitesse de vent de 4,5 m/s et s'accélère ensuite rapidement. La conception particulièrement robuste de l'ensemble a montré que, malgré quelques incidents, la tenue est excellente après 3500 h de fonctionnement sur le site.

Il est apparu que l'instationnarité du vent joue un grand rôle dans le fonctionne ment de la machine et une analyse de la réponse de l'aérogénérateur aux solliciations du vent a été entreprise; elle a montré le rôle important joué par l'inertie du rotor et par suite l'intérêt de réduire sensiblement cette inertie en réduisant le Savonius. Le fonctionnement de la machine a montré que l'appareil est silencieux.



Eolienne Darrieus associée à deux rotors Savonius

(Eolienne expérimentée aux U.S.A.)

CHAPITRE VIII

Brevets d'invention de machines éoliennes

par **Marie-Thérèse MALARTRE**

Chargée de l'Information Scientifique et Technique au CIDETEC

Le développement de chaque entreprise dépend essentiellement de sa capacité à progresser dans un marché en perpétuelle évolution. Le rôle de l'information dans les stratégies mises en oeuvre est en relation directe avec le résultat économique.

Au niveau technique, l'importance de la documentation brevets est mondialement reconnue et l'information qu'elle divulgue n'est généralement pas reprise dans d'autres publications. Les brevets dont l'objet est d'assurer la publicité des inventions, en contrepartie du monopole d'exploitation conféré à leur titulaire, ont une double fonction :

-en tant que documents techniques descriptifs de l'invention, ils renseignent sur l'état de la technique dans le domaine qu'ils couvrent. Ils marquent les étapes du progrès technologique et constituent en fait la mémoire technique de notre société;

-en tant que titres de propriété, ce sont les seuls documents qui matérialisent des droits privatifs et renseignent sur l'étendue des monoples correspondants.

Quiconque néglige de s'informer sur la technique brevetée s'expose non seulement à gaspiller son temps et ses moyens financiers, à ré-inventer ce qui existe, mais également à des poursuites en cas d'exploitation de produits ou procédés couverts par un titre en vigueur.

1. Dépôts de brevets et conjoncture énergétique. - En matière de machines éoliennes, depuis 1973, année du premier choc pétrolier, il a été déposé en France plus de brevets d'invention qu'au cours des 45 années antérieures. Ce regain qui, au départ, correspond à un affolement dû à la crise pétrolière, semble maintenant prendre les traits d'une solution partielle au problème de l'énergie.

On voit en effet, à travers les brevets déposés, se dessiner des axes de recherches et des solutions émanant de sociétés importantes, mais on distingue aussi une pénétration étrangère qui progresse fortement et régulièrement par des dépôts de brevets en France, soit directement, soit par la voie du brevet européen en vigueur depuis 1978.

Trois facteurs influencent le développement de l'énergie éolienne :

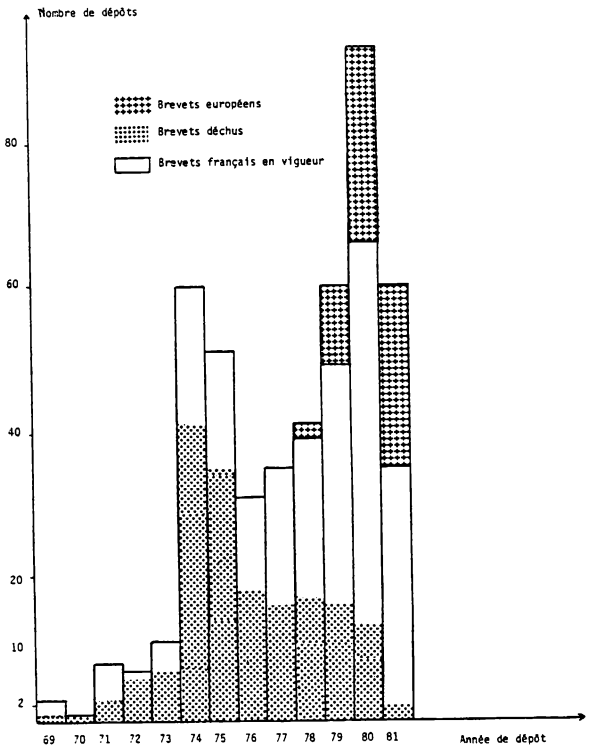
- le coût des énergie fossiles;
- la volonté de diversification des sources d'énergie;
- l'évolution des technologies liées aux éoliennes.

Actuellement, les deux premiers facteurs ouvrent le marché, le troisième ouvre des perspectives de rentabilité.

Pour éviter que ces dernières ne se transforment en royalties versées à des déposants étrangers, il est nécessaire que les entreprises déjà engagées puissent être aidées dans leur action et que celles qui vont se lancer puissent le faire sur des bases techniques sûres.

La documentation constituée par les brevets d'invention offre une large base technique exploitable par les entreprises qui souhaitent se lancer.

2. Analyse des dépôts de brevets. - Nous reprenons ci-après des éléments analytiques extraits d'une étude réalisée par la Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie des Pays de la Loire. Bien que celle-ci ait porté sur l'ensemble des titres publiés depuis 1903, nous ne retenons que des éléments concernant les dépôts effectués depuis 1969 dont l'exploitation est facilitée par l'existence de fichiers informatisés.



Evolution du nombre de brevets (Secteur F03d ayant effet en France)

L'analyse couvre les dépôts de 1969 à 1981 publiés à la date du 31 Décembre 1982, et visant le territoire français, soit au total 471 titres.

Nota. - Il convient de rappeler que le délai de publication d'une demande de brevet étant de dix-huit mois, les chiffres disponibles pour 1981 et 1982 ne reflètent pas le nombre de dépôts effectifs mais le nombre de dépôts publiés.

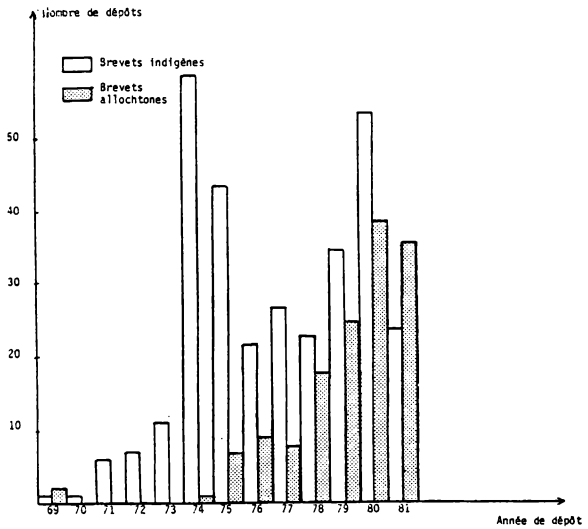
-La date retenue, étant celle du dépôt en France, ne correspond pas, pour les titres d'origine étrangère revendiquant une priorité, au départ de la protection.

-Les diagrammes ont été établis à partir des titres répertoriés dans le secteur FO3d, relatif aux mécanismes moteurs à vent, qui incluent, bien qu'en faible proportion des dispositifs ne concernant pas des éoliennes.

Ce diagramme met en évidence les effets de la crise pétrolière sur le nombre des dépôts avec un pic en 1974 et une remontée considérable entre 1976 et 1980. Il convient cependant de noter la forte proportion de brevets abandonnés pour la période 1974-1975.

Bien que les chiffres doivent être pris avec précaution du fait de la possibilité de restauration, on constate que le nombre de déchéances concerne environ 70% des dépôts de cette période, ce qui conduit à supposer des problèmes d'exploitation des dispositifs décrits.

On constate une très nette progression de la pénétration étrangère, due en partie à la procédure de brevet européen mise en place en 1978 et dont la part est de 30% en 1980.



Il est évident que les étrangers mettent en place des verrous technologiques sur le territoire français.

3. Principaux détenteurs de monopoles. - Parmi les 471 brevets visant la France, sur la période étudiée, on dénombre 10 déposants dont le portefeuille contient 4 titres au moins.

La société disposant du portefeuille le plus important est la société américaine United Technologies Corp. (U.T.C.), titulaire de 16 brevets français et deux brevets européens, tous en vigueur.

Vient ensuite la société allemande Messerschmitt Bolkow Blohm GmbH, avec 9 titres dont un qui est déchu. Ce n'est qu'en troisième position qu'on trouve la société française Aérowatt avec 8 titres dont 3 ne sont plus en vigueur.

DEPOSANT : UTC (United Technologies Corporation)

	NUMERO DE PUBLICATION	DATE DE DEPOT	TITRE
FR	2 362 282	16.08.1977	Turbine éolienne à contrôle automatique de pas et de mouvement de lacet.
FR	2 374 532	05.12.1977	Pale à demi-longeron pour turbine éolienne.
FR	2 428 749	13.06.1979	Commande de génératrice de turbine aérienne.
FR	2 436 891	18.09.1978	Dispositif de retenue des pales des turbines éoliennes.
FR	2 444 562	24.12.1979	Procédé de fabrication de pales de turbines éoliennes.
FR	2 448 048	24.01.1980	Mandrin composite de formation de longeron de pale de turbine éolienne et son procédé de fabrication.
FR	2 478 215	16.03.1981	Système de réglage du pas des pales de turbines éoliennes.
FR	2 478 216	16.03.1981	Système de commande du pas des pales.
FR	2 478 217	16.03.1981	Système de réglage du pas des pales de turbines éoliennes.
FR	2 478 218	16.03.1981	Système de réglage du pas des pales de turbines éoliennes.
FR	2 480 862	22.04.1981	Turbine éolienne comportant un système d'isolation des perturbations provenant du train d'entraînement.
FR	2 482 673	19.05.1981	Turbine éolienne à système de compensation de mouvement de lacet.
FR	2 484 552	19.05.1981	Turbine éolienne à système de compensation de mouvement de lacet.
FR	2 492 354	16.10.1981	Procédé de fabrication d'un article par enroulement de matière de filaments autour d'un gabarit.
FR	2 496 774	24.12.1981	Système de réglage de l'angle de pas de pales pour un générateur de turbine éolienne.
FR	2 507 283	08.06.1982	Structure de montage à faible torsion.
EP	0 008 584	02.08.1979	Système de multiréglage pour des turbines éoliennes.
EP	0 011 330	30.10.1979	Pale composite de turbine éolienne et procédé pour sa fabrication.

DEPOSANT : MESSERSCHMITT BOLKOW BLOHM GmbH

	NUMERO DE PUBLICATION	DATE DE DEPOT	TITRE	DECHU
FR	2 336 568	21.12.1976	Dispositif pour l'exploitation des énergies naturelles.	X
EP	0 009 052	17.08.1978	Eolienne à autoréglage aérodynamique.	
EP	0 009 767	27.09.1979	Rotor d'éolienne à une pale.	
EP	0 017 724	15.02.1980	Accumulateur d'énergie à volant et son utilisation.	
EP	0 019 691	19.03.1980	Pale de rotors constituée d'éléments assemblés juxtaposés.	
EP	0 037 002	17.03.1981	Logement des paliers pour le rotor d'une centrale éolienne.	
EP	0 052 249	21.10.1981	Dispositif d'orientation azimutale.	
EP	0 061 567	02.02.1982	Pale d'hélice aérodynamique et son procédé de construction.	
EP	0 062 737	06.02.1982	Pale de rotor de grande surface.	

DEPOSANT : AEROWATT

Brevets d'invention Français

NUMERO DE PUBLICATION	DATE DE DEPOT	TITRE	DECHU
2 139 649	28.05.1971	Perfectionnements aux aérogénérateurs.	
2 159 565	03.11.1971	Pale d'hélice ou de rotor, en particulier pour aérogénérateurs.	
2 316 454	02.07.1975	Dispositif de régulation de la puissance électrique fournie par un aérogénérateur.	X
2 355 179	16.06.1976	Perfectionnements aux aérogénérateurs à calage de pales variable.	
2 372 972	01.12.1976	Perfectionnements aux pieds de pale d'aérogénérateurs.	X
2 375 464	27.12.1976	Perfectionnements aux hélices bipales d'aérogénérateur.	
2 375 649	27.12.1976	Appareils munis d'un gouvernail d'orientation.	
2 443 591	08.12.1978	Pale mixte pour hélices d'aérogénérateurs.	X

4. Liste sélective de brevets.

Etat de la technique éolienne à travers les brevets d'invention.

La valeur technique des dispositifs décrits dans les brevets est très inégale. Parmi la masse des titres déposés depuis 1969, nous avons retenu la sélection ci-après.

NUMERO DE PUBLICATION	DATE DE DEPOT	DEPOSANT	TITRE ET OBSERVATION
2 139 649	28.05.1971	AEROWATT	Perfectionnements aux aérogénérateurs.
2 159 565	03.11.1971	AEROWATT	Pale d'hélice ou de rotor, en particulier pour aérogénérateurs.
2 285 527	19.09.1975	UNITED STATES ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION	Turbine verticale d'éolienne.
2 286 292	30.09.1974	MAZILLE	Dispositif destiné à capter l'énergie des vents.
2 288 233	15.10.1974	ALEJOS	Rotor éolien vertical à aubes à orientation commandée.
2 300 233	06.02.1975	GIRODIN	Eolienne.
2 316 454	02.07.1975	AEROWATT	Dispositif de régulation de la puissance électrique fournie par un aérogénérateur.
2 319 028	15.07.1976	NATIONAL RESEARCH DEVELOPMENT CORPORATION	Eolienne à axe vertical.
2 325 823	24.09.1975	UNICUM S.A.	Installation utilisant l'énergie du vent notamment pour le chauffage de fluides.
2 339 753	30.01.1976	SOULIE	Dispositif et installation pour le prélèvement de l'énergie cinétique du vent. *Grande tour de prélèvement aérien. Grande aile verticale mobile sur coussin d'hélice. A voir plus en détail.*
2 355 179	16.06.1976	AEROWATT	Perfectionnements aux aérogénérateurs à calage de pales variables.
2 362 282	16.08.1977	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Turbine éolienne à contrôle automatique de pas et de mouvement de lacet.
2 365 710	22.09.1977	SCHNITZER	Machine motrice à vent à roue éolienne.
2 372 971	28.10.1977	HUTTER	Convertisseur d'énergie éolienne.
2 372 972	01.12.1976	AEROWATT	Perfectionnements aux pieds de pale d'aérogénérateurs.
2 374 532	05.12.1977	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Pale à demi-longeron pour turbine éolienne.
2 375 649	27.12.1976	AEROWATT	Appareils munis d'un gouvernail d'orientation.
2 398 195	19.07.1978	EVANS	Moulin à vent. *Machine de DARRIEUS apparemment assez simplifiée. A voir.*
2 405 378	06.10.1977	LEFEBVRE	Eolienne à axe vertical. *A voir.*
2 406 094	12.10.1978	HERTER	Turbine éolienne. *Machine de DARRIEUS à pales orientables. A voir plus en détail.*
2 410 749	04.12.1978	FIAT	Pale pour hélice d'éolienne.
2 415 211	22.12.1978	FIAT	Régulateur de pas pour pales de rotor d'éolienne.
2 428 749	13.06.1979	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Commande de génératrice de turbine aérienne.
2 436 890	20.09.1978	FOA	Eolienne à axe vertical. *Machine de DARRIEUS à pales constituée de bulbes hémisphériques. Vu à la télévision en Israël. A voir plus en détail.*
2 436 891	18.09.1979	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Dispositif de retenue des pales des turbines éoliennes.
2 442 978	29.11.1978	FALLY	Turbine éolienne à axe vertical. *Machine de DARRIEUS en pales paraboliques. A voir plus en détail.*
2 443 591	08.12.1978	AEROWATT	Pale mixte pour hélices d'aérogénérateur.
2 444 562	24.12.1979	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Procédé de fabrication de pales de turbines éoliennes.

NUMERO DE PUBLICATION	DATE DE DEPOT	DEPOSANT	TITRE ET OBSERVATION
2 448 048	24.01.1980	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Mandrin composite de formation de longeron de pale de turbine éolienne et son procédé de fabrication.
2 448 646	09.02.1979	CARME	Nouveau type d'éolienne et dispositif mis en oeuvre dans ladite éolienne de transformation du mouvement rotatif de l'arbre portant la roue à pales ou l'hélice en un mouvement alternatif rectiligne.
2 449 207	12.02.1980	FIAT	Pale pour moteur à vent.
2 452 008	20.03.1979	CHAILLOU	Eolienne. *Machine de DARRIEUS en pales paraboliques. A voir plus en détail.*
2 459 380	19.06.1979	GAL	Eolienne à axe vertical. *Machine de DARRIEUS à effet thermique. Machine essayée au CSTB.*
2 459 381	20.06.1980	BUDD COMPANY	Ensemble à longeron pour structure à pales effilées, et son procédé de réalisation.
2 465 899	21.09.1979	DUPORT	Système de régulation de sécurité pour éolienne à axe vertical.
2 468 000	24.10.1979	CHARPENTIER ET CALIGE	Aéromoteur à régulation automatique par mise en drapeau du rotor.
2 468 001	24.10.1979	CHARPENTIER ET CALIGE	Montage monobloc pour aéromoteurs.
2 472 677	24.12.1979	LAMBERT	Hélice pour éolienne à pale unique et à dispositif auxiliaire de démarrage.
2 472 678	28.12.1979	VILLEBRUN	Eolienne à régulation de vitesse par la vitesse même du vent et dispositif de mise en oeuvre d'une telle éolienne.
2 473 639	16.01.1980	CARME	Aérogénérateur à axe d'orientation commandé.
2 473 642	11.01.1980	CARME	Aérogénérateur à dérive mobile.
2 478 215	16.03.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Système de réglage du pas des pales de turbines éoliennes.
2 478 216	16.03.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Système de commande de pas de pales.
2 478 217	16.03.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Système de réglage du pas des pales de turbines éoliennes.
2 478 218	16.03.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Système de réglage du pas des pales de turbines éoliennes.
2 480 862	22.04.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Turbine éolienne comportant un système d'isolation des perturbations provenant du train d'entraînement.
2 481 756	21.11.1979	COURCEL	Dispositifs de régulation automatique et de protection des pales du rotor d'aérogénérateurs à axes verticaux.
2 482 673	19.05.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Turbine éolienne à système de compensation de mouvement de lacet.
2 484 552	19.05.1981	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Turbine éolienne à système de compensation de mouvement de lacet.
0 008 584	02.08.1979	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Système de multiréglage pour des turbines éoliennes.
0 009 052	17. 08. 1978	MESSERSCHMITT	Eolienne à autoréglage aérodynamique.
0 009 767	27.09.1979	MESSERSCHMITT	Rotor d'éolienne à une pale.
0 011 330	30.10.1979	UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION	Pale composite de turbine éolienne et procédé pour sa fabricatic
0 016 602	11. 03. 1980	GILCHRIST	Rotors d'aéromoteur entraînant des générateurs électriques.
0 019 691	19.03.1980	MESSERSCHMITT	Pale de rotor constituée d'éléments assemblés juxtaposés.
0 021 810	20.06.1980	CONTROL TECHNOLOGY LIMITED	Eolienne à dispositif de mise en drapeau.
0 025 251	04.09 1980	ECN NETHERLANDS ENERGY RESEARCH FOUNDATION	Procédé et dispositif pour dériver de l'énergie d'un écoulement de fluide.
0 025 791	19.03.1980	PETTERSSON	Moulin à vent.
0 030 357	02.12.1980	SIEMENS	Générateur de courant à roue éolienne.
0 040 193	04.03.1980	JOUTSINIEMI	Hélice éolienne.

CHAPITRE IX

Caractéristiques d'utilisation des éoliennes

I. - LES DOMAINES D'UTILISATION DES EOLIENNES.

Les utilisations traditionnelles des éoliennes ont été, des siècles durant, le pompage de l'eau et le broyage des grains. Une diversification bien plus importante pourrait avoir lieu, en complément des systèmes énergétiques existants, et plus particulièrement grâce à la production d'énergie électrique. On peut classer ces domaines d'applications selon les puissances requises :

-Besoins domestiques : la puissance des machines est de l'ordre de quelques kilowatts à une vingtaine de kilowatts. Le chauffage éolien est l'application privilégiée car la demande coïncide bien avec la disponibilité en énergie éolienne et le stockage thermique est simple et peu onéreux. L'apparition de nouveaux accumulateurs (soufre/ sodium, par exemple) ou de piles à combustible performantes permettrait seule un stockage économique de l'énergie électrique et le développement de la traction électrique. (J. HLADIK - 1971 - 1977). Le pompage de l'eau est également intéressant.

-Besoins agro-industriels : les puissances requises seraient de quelques dizaines de kilowatts. Les applications agricoles et agro-alimentaires sont très nombreuses: chauffage de bâtiments d'élevage, de serres horticoles et maraîchères, de production d'eau chaude; aquaculture; déshydratation; broyage;etc. Les industries de dépollution seraient intéressées : aération des lacs et des bacs de décantation des stations d'épuration. De nombreuses petites et moyennes industries pourraient trouver un complément énergétique intéressant : chauffage de locaux, séchage, pompage, dessalement, broyage, électricité pouvant fournir de hautes températures,etc.

-Besoins locaux et nationaux : des "parcs éoliens" de quelques dizaines de machines de 50 à 100 kW chacune, commencent, dès à présent, à fournir de l'électricité à des réseaux locaux aux Etats-Unis. Les réseaux d'îles et de territoires isolés sont également intéressés (île d'Ouessant, île de la Madeleine au Québec, Argentine). Au niveau national, le couplage de grands aérogénérateurs au réseau de distribution est déjà envisagé dans divers pays : Danemark, Allemagne, Suède,Etats-Unis.

II. - CARACTERISTIQUES PRATIQUES DES EOLIENNES.

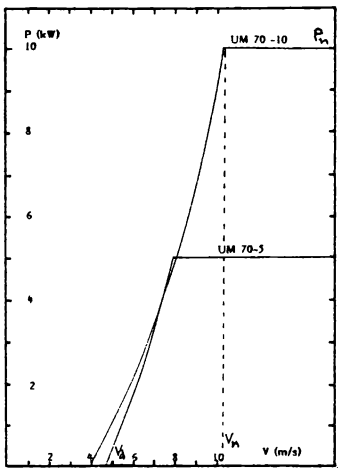
1. Courbe de puissance - Vitesse du vent. - Le choix d'une machine particulière sera déterminé par ses caractéristiques techniques, son prix d'achat et sa rentabilité à long terme. D'autres motivations existent actuellement pour l'achat d'une éolienne (intérêt technologique, motif idéologique,snobisme,etc); bien qu'elles soient transitoires ces motivations peuvent aider aux développement des éoliennes.

Les constructeurs fournissent les courbes de puissance, en fonction de la vitesse du vent, des machines qu'ils commercialisent et le Centre d'Essais de Lannion devrait permettre d'obtenir une meilleure précision dans la donnée de ces courbes. On a les définitions suivantes pour les courbes de puissance :

- $-V_d$: vitesse de démarrage : c'est la vitesse de vent au-dessus de laquelle l'hélice commence à tourner;
- $-V_f$: vitesse de fourniture : vitesse de vent au-dessus de laquelle l'éolienne commence à produire une puissance utile;
- $-P_n$: puissance nominale : c'est la puissance maximale que peut délivrer l'éolienne;
- $-V_n$: vitesse nominale : c'est la vitesse du vent pour laquelle l'éolienne délivre sa puissance maximale;
- $-V_{hs}$: vitesse hors service : vitesse de vent à partir de laquelle l'éolienne doit être arrêtée.

Les courbes de puissance ont généralement la forme donnée par le graphique suivant.

Une éolienne à calage variable pourra avoir des vitesses nominales ajustables selon le réglage du système de régulation. Ainsi les machines AEROWATT (série G) sont disponibles pour trois vitesses de vent nominales : 5 m/s pour les sites peu ventés; 7 m/s pour les sites moyens; 10 m/s pour les sites ventés. La série UM 70 est adaptée aux vitesses nominales suivantes : 7 m/s; 8,5 m/s et 10,5 m/s.



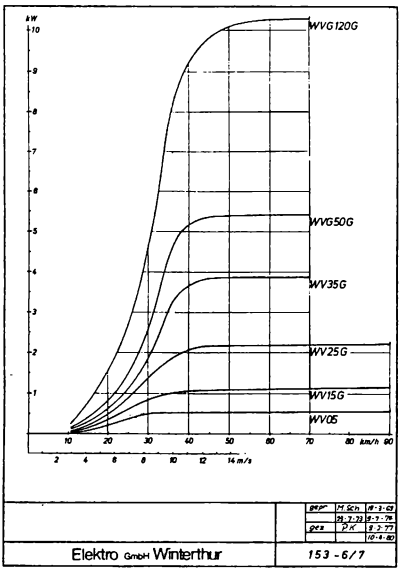
Courbe de puissance de l'éolienne AEROWATT U.M.70-10

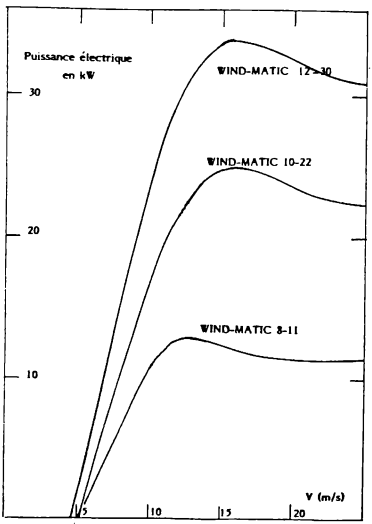
V_n=10,5 m/s; P_n= 10 kW

Courbe de puissance de l'éolienne AEROWATT U.M. 70-5

V_n=8,5 m/s; P_n= 5 kW

Eoliennes de chauffage





Courbes de puissance des éoliennes ELEKTRO (Suisse) et WIND-MATIC (Danemark)

ELEKTRO : WV05 : diamètre 2,5m; WV15G : 3m; WV25 G : 3,6m; WV35G : 4,4m; WV 50G : 5m; WV 120G : 6m.

WIND-MATRIC : WM8.11 : Diamètre 8 m; WM 10-22 : 10m; WM 12-30 : 12m

2. Calcul de l'énergie produite par une éolienne. - Connaissant l'histogramme des distributions des vitesses moyennes du vent pour un site, à la hauteur à laquelle on envisage de placer une éolienne, on peut calculer l'énergie produite annuellement à l'aide de la courbe de puissance de l'éolienne. Pour cela, on calcule, pour chaque vitesse V_i , le produit :

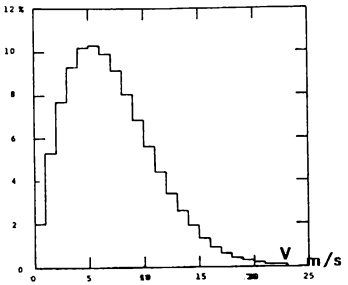
$$E \ (kWh) = N_i \ P_i$$

où N_i est le nombre d'heures où le vent a soufflé à la vitesse V_i ; P_i est la puissance en kW de l'éolienne pour le vent V_i ; l'énergie est alors obtenue en kilowatts-heures. La somme de toutes les énergies E_i , dans la gamme des vitesses comprises entre V_f et V_{hs} , donnera l'énergie moyenne fournie annuellement par la machine.

Cette énergie sera, dans tous les cas, très inférieure à l'énergie cinétique totale du vent. On a les valeurs suivantes, en pourcentage, pour le rapport entre l'énergie fournie par diverses éoliennes et l'énergie totale du vent

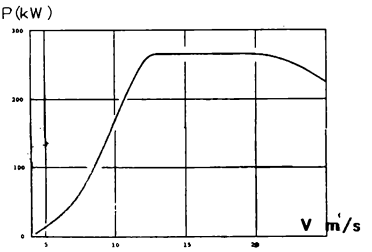
Station météorologique d'AVRILLE (près d'ANGERS) à 10 m au-dessus du sol.

AEROWATT : 4100 FP7 : 20% - DUNLITE : 5 kW : 26,3% -
ELEKTRO : W 50 G : 35,1% - WIND-MATIC : WM 8.11 : 34,3 %



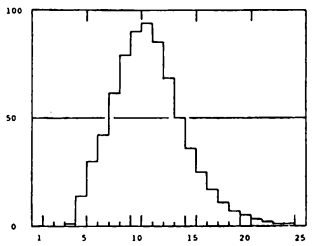
Histogramme des vitesses du vent

Site de Torsminde (Danemark)

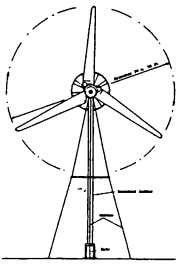


Courbe de puissance

Eolienne danoise VOLUND -265 kW-



Energie annuelle en MWh en fonction des vitesses du vent



Eolienne VOLUND (Danemark)

3. Energie produite et régularité de fourniture. - Un premier critère de choix d'une éolienne pourra être déterminé en privilégiant la machine qui produit le plus d'énergie, rapportée au m² de surface rotorique. Pour cela, on fait le calcul à partir des différentes courbes de puissances des machines et on chosit l'éolienne qui fournit l'énergie moyenne la plus élevée.

Cependant, ce critère est loin d'être le seul à considérer, car il faut également tenir compte de la manière dont on va utiliser l'énergie produite par la machine. En particulier, la régularité de la fourniture sera, la plupart du temps, un facteur important. Cette régularité peut être un impératif, dans le cas par exemple, de l'éclairage d'une balise maritime et elle permet de minimiser le stockage qui, de toute façon, est limité dans ce cas précis. Pour le chauffage éolien, un stockage plus important peut être prévu mais le facteur de régularité interviendra cependant permettant de réduire les frais de stockage.

Un compromis judicieux devra donc être fait généralement entre la quantité totale d'énergie fournie au cours d'une année et la régularité de cette fourniture.

Pour le constructeur, l'adaptation d'un moteur éolien donné (diamètre fixé et profil déterminé), pourra se faire en choisissant des vitesses nominales différentes et des convertisseurs variés selon les utilisations envisagée.

III. - FABRICANTS FRANCAIS D'EOLIENNES.

(liste diffusée par l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie).

1. Fabricants d'aérogénérateurs. -

AEROTURBINE - 38 Boulevard de la Duchesse Anne - 35000 - RENNES -
AEROWATT - 37 rue de Chanzy - 75011 - PARIS -
DURANTEAU - 28 rue Auguste Lansier - 85000 - LA ROCHE-SUR-YON -
ENAG - Route de Pont-L'Abbé - 29000 - QUIMPER -
EOLEC (Aéropower) - Route de Louviers -VENON- 27110 - LE NEUBOURG -
HUMBLOT - 8 rue d'Alger Coussey - 88200 - NEUFCHATEAU -
PROENGIN - 3 avenue de Colifichet - 78290 - CROISSY-SUR-SEINE -
SUNDWIND-ENERGIES - Z.I. Petite Cocotte - 97224 - DUCOS-FORT DE FRANCE
UNICUM - 22 rue Tiblier Verne - 42100 - SAINT-ETIENNE -

2. Fabricants d'éoliennes de pompage.

ALSTHOM-ATLANTIQUE - 18320 -JOUET-SUR-L'AUBOIS -
BRUNO (Mistral) - Z.I. Borsang-les-Laval - 53210 - ARGENTRE -
CEMA - 37 rue du Maréchal Foch - 69220 - BELLEVILLE-SUR-SAONE -
DELLO (Sahores) - 4 rue Pierrelevée - 75011 - PARIS -
GUILLEMOT (Simoun) - 10270 - LUSIGNY-SUR-BARSE -
HUMBLOT - 8 rue d'Alger Coussey - 88200 -NEUFCHATEAU-
PONCELET - B.P. N°1 - 10380 -PLANCY-L'ABBAYE -
TEMSOL-AQUITAINE - Z.I. du Phare - Avenue du Truc - 33700 - MERIGNAC -
S.A.N.E. (Société des Applications Nouvelles de l'Energie)
"Le Château" - 1 route de Laure - 13220 - CHATEAUNEUF-LES-MARTIGUES.

3. Fabricant de pales d'éoliennes.

S.A.N.E. (Société des Applications Nouvelles de l'Energie) - "Le Château" - 1 route de Laure - 13220 - CHATEAUNEUF-LES-MARTIGUES.

I V. LES SYSTEMES DE CONVERSION.

1. Conversion en énergie utilisable. - L'énergie mécanique disponible sur l'arbre du moteur éolien peut être utilisée sous diverses formes à l'aide d'un système de conversion. On obtiendra les formes suivantes :

-énergie mécanique pour l'entraînement de pompes à piston ou centrifuge, compresseur pour la production d'air comprimé, compresseur de pompe à chaleur,etc;

-énergie calorifique produite par frein hydraulique, courants de Foucault,etc;

-énergie électrique produite par alternateur ou génératrice à courant continu.

La plupart des machines couplées au moteur éolien n'atteindront, en général, des puissances égales à celles du moteur éolien que lorsqu'elles tourneront à des vitesses élevées, de l'ordre de 10 à 30 fois les vitesses de rotation de l'éolienne. Ceci imposera l'intermédiaire de un ou plusieurs multiplicateurs entre l'arbre du moteur éolien et le système de conversion. Certains constructeurs ont équipé leurs éoliennes de génératrices spécialement conçues pour débiter à faibles vitesses de rotation; c'est le cas des aérogénérateurs ENAG.

2. Caractéristique puissance-vitesse de rotation du moteur éolien. - Pour une vitesse de vent donné, la puissance mesurée sur l'arbre d'un moteur éolien, en fonction de la vitesse de rotation, est une courbe caractéristique passant par un maximum correspondant aux conditions optimales de fonctionnement. Pour les différentes vitesses de vent, on obtient une série de caractéristiques puissance-vitesse de rotation dont le lieu des maxima est une courbe fonction du cube de la vitesse.

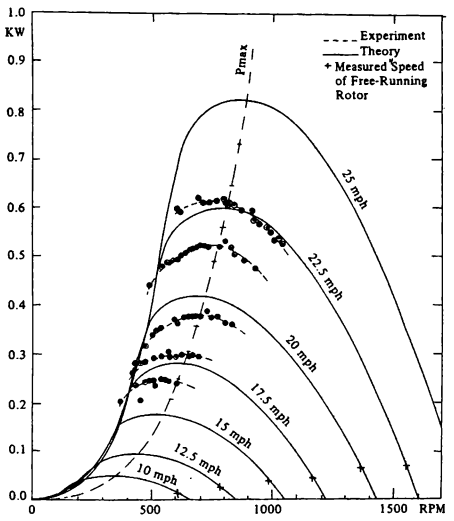
L'équation de ce lieu est obtenue en considérant l'expression de la puissance P, liée au facteur de conversion C_p par :

$$P = 0{,}5.\ 3{,}14.\ d\ C_p\ R^2\ V^3$$

La puissance maximale P_M correspond au facteur de conversion C_{pM} et est donc de la forme : $P_M = kV^3$.

Pour une éolienne à calage fixe (éolienne multipale, par exemple), le facteur de conversion C_{pM} a une valeur fixe correspondant à un paramètre de fonctionnement h_M donné. La vitesse de rotation N étant proportionnelle à la vitesse périphérique U des pales, on a pour les vitesses V de vent, la relation suivante pour les maxima

$$V = U / h_M = k' N$$



Puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse de rotation

Eolienne tripale - Diamètre 1,55m - Profil NACA 4412 -Paramètre maximum de fonctionnement : 6,5 - (Mercadier- Wind Eng. Vol 2. 1978)

Par suite, la puissance maximale P_M en fonction de la vitesse de rotation N est une cubique de la forme :

$$P_M = k\,V^3 = k\,k'N^3$$

avec $k = 1{,}57\ d\ C_{pM} R^2$, $k' = 6{,}28\ R / 60\ h_M$, lorsque la vitesse de rotation est exprimée en tours par minute.

Pour une éolienne à calage variable, le facteur de conversion C_{pM} varie en fonction de l'angle de calage et correspond à des valeurs différentes du paramètre de fonctionnement optimum. Cependant, on a vu qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, donc de vitesse de rotation, le calage optimal était pratiquement maintenu constant.

C'est le cas, par exemple, pour les aérogénérateurs AEROWATT dont le calage des pales reste fixe entre 0,2 N_n et N_n ,vitesse nominale. Par suite, au-delà d'une vitesse de rotation égale au cinquième de la vitesse nominale, le facteur de conversion optimal est constant et la puissance maximale de l'éolienne sera également une cubique en fonction de la vitesse de rotation.

Les vitesses maximales de rotation des aéromoteurs sont relativement faibles. Pour les grands aérogénérateurs, elles sont inférieures à 100 tr/mn : éolienne de TVIND, 54 m de diamètre, 42 tr/mn; aérogénérateur BEST-ROMANI : 30,2 m de diamètre, 47,3 tr/mn. Pour les petites machines, ces vitesses dépassent rarement 200 tr/mn : aérogénérateur AEROTURBINE : 8,4 m de diamètre, 102 tr/mn; aérogénérateur AEROWATT de 9,2 m de diamètre, 152 tr/mn. Les très petites machines peuvent avoir des vitesses élevées de rotation : 860 tr/mn pour une machine AEROWATT de 1,34 m de diamètre.

3. Caractéristique puissance -vitesse de rotation du convertisseur. - Les systèmes de conversion couplés aux aéromoteurs ont en général des caractéristiques de puissance correspondant à des vitesses élevées de rotation. On a, par exemple, les données suivantes :

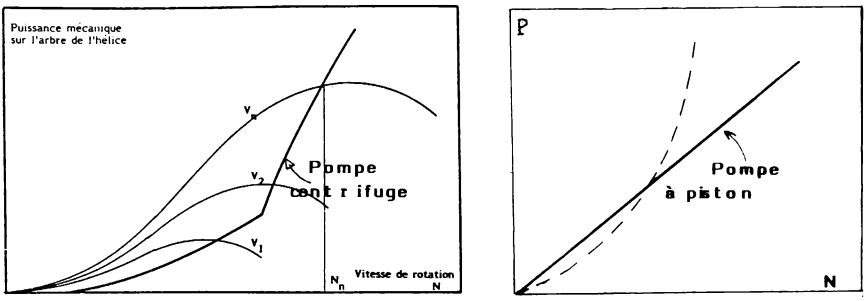
-alternateur UNELEC - 2 pôles - (Réf. AT160 LA 060) : 4 kW à 3000 tr/mn;

-pompe centrifuge GUINARD : 1900 tr/mn pour un débit de 3,9 m^3/h et une HMT de 45 m;

-coupleur hydrocinétique SIME INDUSTRIE : coupleur de 27 cm de diamètre puissance : 1,1 kW à 750 tr/mn; 9 kW à 1450 tr/mn.

Ces exemples montrent la nécessité d'un multiplicateur qui sera de l'ordre de 15 à 30 selon les moteurs éoliens et les convertisseurs.

D'autre part, on aura intérêt à faire tourner l'aéromoteur à des vitesses correspondant aux puissances optimales. Or les caractéristiques des convertisseurs ne sont pas, en général, des cubiques et l'ensemble couplé éolienne-convertisseur ne pourra pas fonctionner avec un facteur de conversion optimal.

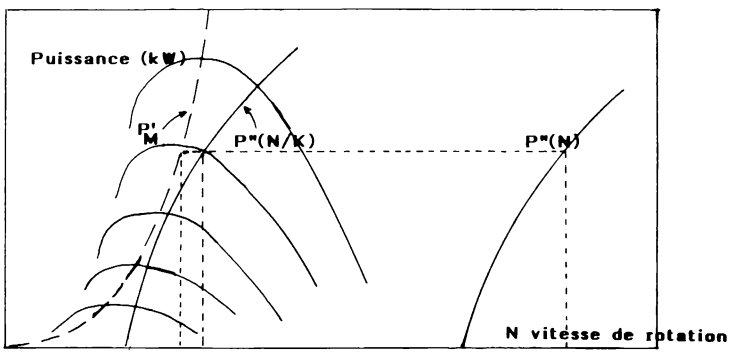


Caractéristiques de puissance de convertisseurs en fonction de la vitesse de rotation

Les convertisseurs dont le principe physique de fonctionnement (système tournant dans un fluide) est analogue à celui d'une éolienne ont seuls des caractéristiques de puissance de type cubique, tout au moins dans une gamme assez large de puissances. C'est le cas des coupleurs hydrocinétiques, des pompes centrifuges et des compresseurs centrifuges de pompes à chaleur. Par contre, les génératrices électriques, les pompes à piston, les compresseurs à piston de pompes à chaleur, ont des caractéristiques de type différent d'une cubique.

Quoi qu'il en soit, il faudra faire un compromis judicieux afin de choisir un rapport de multiplication convenable permettant, autant que possible, d'optimiser l'énergie fournie à la sortie du convertisseur.

4. Détermination du rapport de multiplication. - Les multiplicateurs ont, en général, d'excellents rendements, de l'ordre de 95 à 98%. On peut donc déduire les caractéristiques de puissance en sortie de l'arbre du multiplicateur, en multipliant la puissance obtenue sur l'arbre de l'aéromoteur par le rendement de ce multiplicateur. Soit $P'_M(N)$ la courbe des maxima ainsi obtenue.



Détermination du rapport de multiplication

Soit P"(N) la caractéristique de puissance d'entrée du convertisseur. Cette caractéristique sera déduite de celle de sortie en ajoutant, pour chaque vitesse, les pertes de puissance dues au convertisseur lui-même. Par exemple, pour une alternateur, on aura des pertes par effets Joule, par effets magnétiques ainsi que des pertes mécaniques.

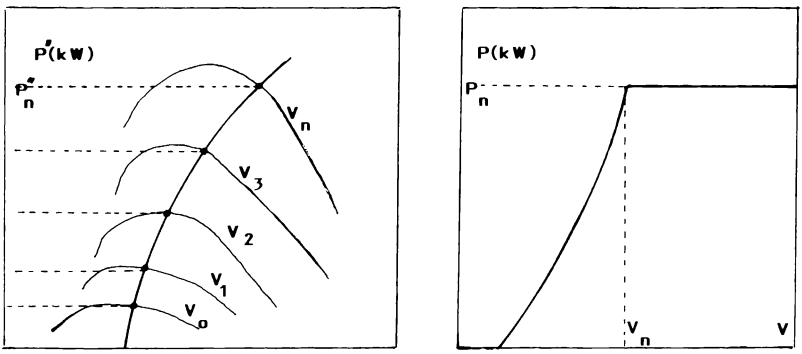
La détermination du rapport de multiplication, K , se fera en choisissant une valeur de la puissance telle que $P'_M(N_1) = P''(N_2)$.Le rapport de multiplication sera alors $K = N_2 / N_1$.

On choisira un rapport K tel que la courbe de fonctionnement P"(N/K) soit la plus proche possible de la courbe des puissances maximales $P'_M(N)$, afin que l'éolienne fonctionne au plus près de l'optimum.

Cependant, il faut éviter un freinage excessif de l'éolienne ce qui entraînerait la diminution de la vitesse de rotation et par suite le décrochage. Le rapport de multiplication devra donc être choisi tel que la courbe P"(N/K) soit plutôt située vers la droite de la courbe $P'_M(N)$, permettant des vitesses plus élevées de rotation.

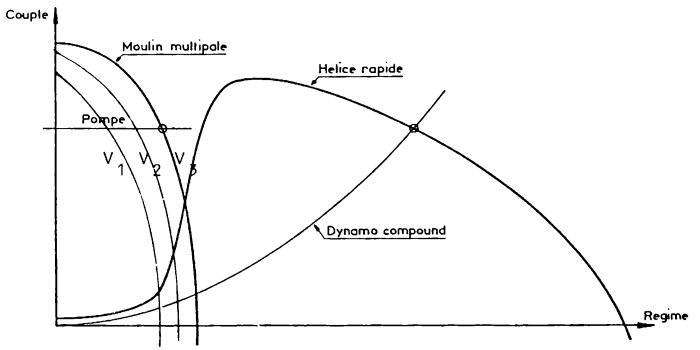
5. Courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent. - Les coordonnées des points d'intersection de la courbe P"(N/K) avec les courbes caractéristiques puissance-vitesse de l'éolienne, donneront la puissance effectivement fournie par l'éolienne, à la sortie de l'arbre du multiplicateur, et sa vitesse de rotation pour chacune des vitesses de vent.

On peut ainsi tracer une courbe de puissance P"(V). On en déduit alors la courbe de puissance P(V) à la sortie du convertisseur en tenant compte des pertes internes du système de conversion. Cette courbe puissance-vitesse du vent est celle qui intéresse l'usager et qui est généralement fournie par le constructeur. La puissance est limitée à une certaine valeur maximale P_n , puissance nominale, correspondant à une vitesse de vent V_n , vent nominal.



Détermination de la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent

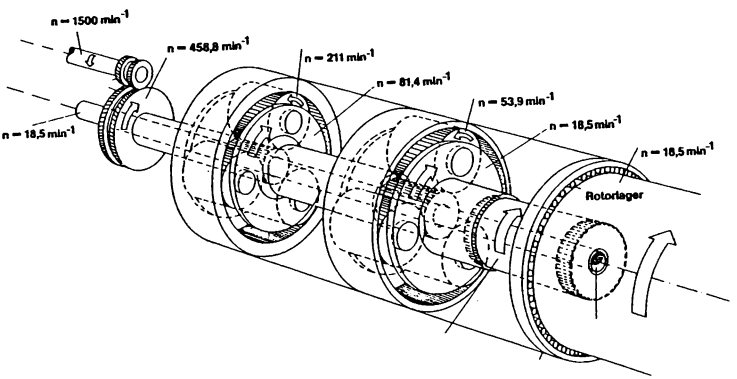
6. Diagramme couple-vitesse de rotation. - La détermination des caractéristiques du couplage entre une éolienne et son conver tisseur peut également se faire en raisonnant sur les caractéristiques du couple de l'aéromoteur en fonction de la vitesse de rotation, pour différentes vitesses de vent. La détermination du rapport de multiplication fait alors intervenir la caractéristique de couple du convertisseur.



7. Les multiplicateurs. - Les multiplicateurs industriels existent dans une gamme de puissances transmises très étendue, depuis quelques centaines de watts jusqu'à plusieurs mégawatts. Leurs rendements sont excellents, jusqu'à 98%, et leur fabrication industrielle conduit à des prix minima.

Les rapports de multiplication utilisés pour les aérogénérateurs de petite puissance, ou les autres types de convertisseurs, sont peu élevés et classiques; par exemple, la société AEROTURBINE utilise des multiplicateurs GIRARD et ELLI ayant des rapports de l'ordre de 20. Les vitesses de fonctionnement des coupleurs hydrocinétiques étant situés dans une gamme de 1500 à 3000 tr/mn nécessiteront également des rapports de multiplication de l'ordre de 15 à 30.

Pour les grands aérogénérateurs, tournant relativement lentement (18,5 tr/mn pour GROWIAN; 42 tr/mn pour TVIND), des rapports de multiplication plus importants sont nécessaires; ainsi, par exemple, la génératrice de GROWIAN tournant à 1500 tr/mn et la vitesse nominale de rotation de l'aéromoteur étant de 18,5 tr/mn, un rapport de multiplication de 81 est nécessaire et est obtenu par un multiplicateur à satellites.



Multiplicateur de l'aérogénérateur GROWIAN

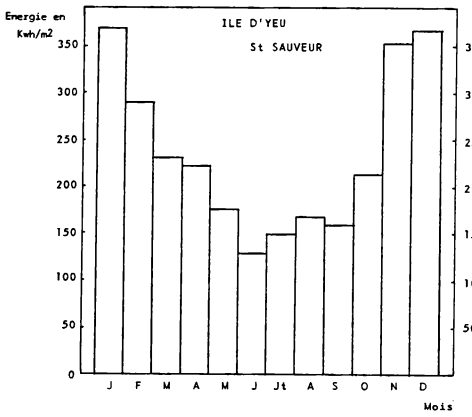
CHAPITRE X
Le chauffage éolien

I. - INTERET DU CHAUFFAGE EOLIEN.

1. Pouquoi des éoliennes de chauffage ? - Parmi les besoins énergétiques susceptibles d'être satisfaits par l'emploi des éoliennes, le chauffage des locaux est sans doute celui qui coïncide le mieux avec la disponibilité en énergie éolienne. Certes le couplage d'aérogénérateurs de grandes dimensions à un réseau de distribution d'électricité conduirait au meilleur prix de revient du kilowatt-heure et l'on pourrait penser que de petites et moyennes éoliennes de chauffage offrent un moindre intérêt.

Cependant, pour l'investisseur privé, qu'il s'agisse d'un particulier, d'une collectivité ou d'une entreprise, le problème de la rentabilité optimale se pose différemment. L'électricité produite par un aérogénérateur est en effet une marchandise dont la disponibilité est aléatoire et son prix de vente à une compagnie de distribution ne pourra nécessairement pas être le même que celui d'une fourniture d'électricité disponible à la demande.C'est effectivement la politique d'achat adoptée par les compagnies de distribution d'électricité, qu'elles soient privées ou nationalisées.Par suite, le propriétaire d'une éolienne aura intérêt à consommer lui-même sa production principalement sous forme de chauffage, car les autres utilisations directes de l'électricité ne sont guère envisageables dans l'état actuel de la technologie des accumulateurs (J. HLADIK - "Les accumulateurs électriques" - P.U.F. - 1977).

Réportition mensuelle de l'énergie éolienne moyenne
(période : 1951 - 1975)



Mois	Energie Kwh/m2
J	368,3
F	289,4
M	231,4
A	221,7
M	175,7
J	128,4
Jt	150,7
A	137,7
S	159,5
O	212,7
N	352,9
D	365,3

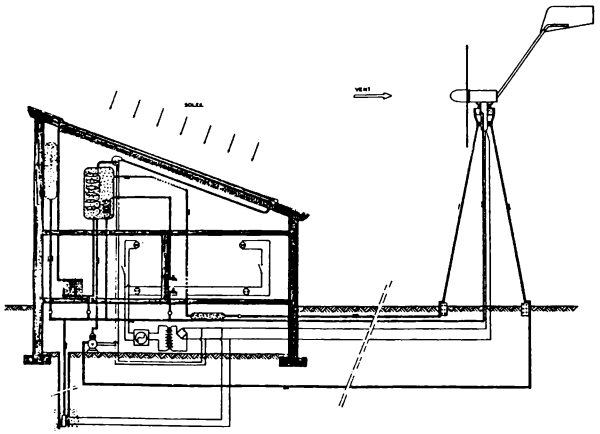
Le vent souffle davantage en hiver qu'en été.

Le handicap dû au caractère aléatoire de l'énergie fournie par les éoliennes peut être compensé, pour le chauffage :

-soit par une utilisation au fil du vent, en complément d'un chauffage traditionnel déjà installé;

-soit par un stockage thermique important pour une éolienne de grandes dimensions. Quoi qu'il en soit de l'option retenue, le prix classique de la thermie ainsi économisée peut alors être pris en considération pour évaluer la rentabilité d'un investissement éolien, et ce prix sera largement supérieur au prix moyen de rachat de l'énergie produite.

D'autre part, si la finalité envisagée est essentiellement le chauffage - et dans de nombreuses régions de France, environ 70% du potentiel éolien est disponible durant les mois de chauffage - il n'est pas besoin à priori d'envisager l'électricité comme vecteur énergétique. Se trouve alors posé le problème de construire des éoliennes peut-être plus performantes et éventuellement moins chères que des aérogénérateurs.



Chauffage par énergies solaire et éolienne - Projet L. ROMANI -

2. Etudes et expérimentations de chauffage éolien. - Le rapport de J.P. MARIE et H. PENICAUD (1982), montre que dès 1976 le "Plan Construction" et le Commissariat à l'Energie Solaire ont lancé des recherches sur les potentialités de l'utilisation de l'énergie éolienne pour le chauffage de l'habitat. Divers travaux exploratoires commencèrent sur la cartographie des vitesses de vent en France (travaux du C.S.T.B.) ainsi qu'une recherche sur la simulation numérique d'une installation de chauffage éolien (CLAUSIN J. -1979).

Deux études expérimentales furent également prises en charge : chez BERTIN, pour l'étude d'un convertisseur à frein hydraulique en vue de la production d'eau chaude avec couplage à une éolienne à axe vertical; une étude de faisabilité et d'expérimentation d'une nouvelle éolienne à axe vertical (GAL -1979).

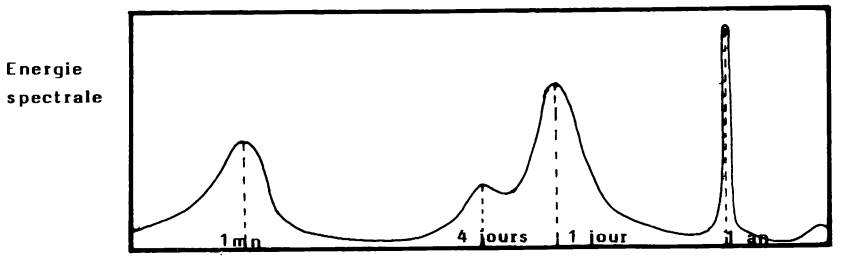
Divers essais d'utilisation de l'énergie éolienne pour le chauffage des bâtiments sont en cours actuellement en France et nous en donnons ci-après quelques exemples. Dans notre rapport "Energie éolienne dans la Région des Pays de la Loire - Applications pratiques" (J. HLADIK et coll.- 1981), réalisé pour le compte du COMES et de la Région des Pays de la Loire, nous avions relevé un certain nombre de réalisations régionales et il est vraisemblable que des essais similaires ont été entrepris dans d'autres régions.Diverses études et expérimentations ont été effectuées aux Etats-Unis et au Canada depuis une dizaine d'années et l'article de CROMACK, GOWAY et HERONEMUS (1980) fait le point sur ces travaux. Une étude détaillée de la modélisation du chauffage éolien est faite dans un ouvrage du Franklin Institue Press (1980) traduit en français.

II. - BESOINS DE CHAUFFAGE ET ENERGIE EOLIENNE

La bonne corrélation entre divers paramètres éoliens et climatiques va nous montrer l'intérêt que présente l'énergie éolienne pour le chauffage des bâtiments. Par ce dernier terme, on entend à la fois l'habitat, les bâtiments tertiaires, industriels et agricoles ainsi que les serres horticoles et maraîchères.

1. Variations mensuelles de l'énergie éolienne. - Il est bien connu que le vent souffle plus fréquemment en hiver qu'en été.Les besoins en chauffage coïncident donc, en toute première approximation, avec la variation saisonnière d'énergie que nous offre le vent.Cela semble donc un atout important pour le chauffage éolien, contrairement au solaire direct qui décroît lorsqu'augme ntent les besoins de chauffage

Les variations de l'énergie du vent peuvent être représentées par le "spectre d'énergie du vent" qui montre la périodicité dans le temps des maxima de l'énergie éolienne.On peut noter quatre maxima correspondant à des fréquences d'échelle très différente :



Spectre d'énergie du vent

-un premier pic correspondant à la variation saisonnière de l'énergie éolienne et sa période est évidemment égale à un an; il traduit le fait qu'il y a plus de vent en hiver qu'en été sous nos climats.

- le deuxième pic correspond à l'échelle de temps des mouvements atmosphériques de large amplitude. Ce sont les perturbations cycloniques qui ont une période de quatre à six jours selon les régions du globe.

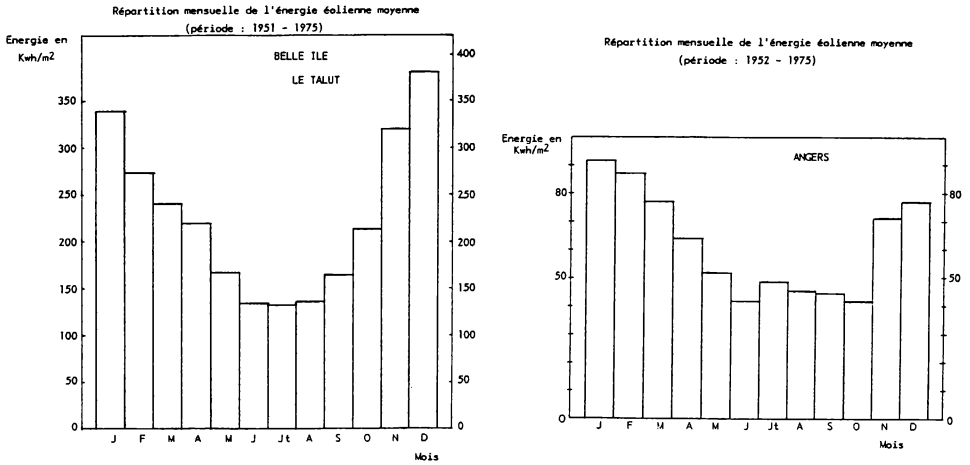
-un troisième maximum correspond à la variation thermique de jour et de nuit, le vent étant souvent plus fort en milieu de journée que la nuit.

-le quatrième pic a une période de l'ordre de la minute et est en relation avec les fluctuations de la vitesse instantanée du vent près du sol; c'est la turbulence du vent.

Les calculs que nous avons effectués, mois par mois, pour diverses stations météorologiques, montre que la forme de la variation annuelle est, en première approximation de type sinusoïdal.Les variations de l'énergie éolienne sont plus ou moins accentuées selon les stations, allant du simple au double ou au triple entre été et hiver.Pour la station d'Avrillé, proche d'Angers, l'énergie éolienne moyenne (période 1952-1975) en janvier est de 91,3 kWh/m² alors qu'en juin elle est de 41,8 kWh/m².

Pour des régions plus ventées, notamment dans les îles et sur les bordures littorales, les variations saisonnières sont plus fortement accentuées.Pour la station de Saint-Sauveur, dans l'île d'Yeu, l'énergie éolienne passe de 128,4 kWh/m² en juin à 368,3 kWh/m² en Janvier (ces mesures sont effectuées à 22,6 m au-dessus du sol et correspondent à la période 1952-1975).

Pour une période de chauffage allant de début octobre à fin avril, l'énergie éolienne moyenne pour ces 7 mois, à la station d'Avrillé, est de 68,7% de l'énergie annuelle moyenne.A titre d'exemple, pour l'année 1980, la vitesse moyenne annuelle du vent a été, pour cette même station, de 3,6 m/s alors que durant la période de chauffage cette vitesse moyenne a été de 3,85 m/s.



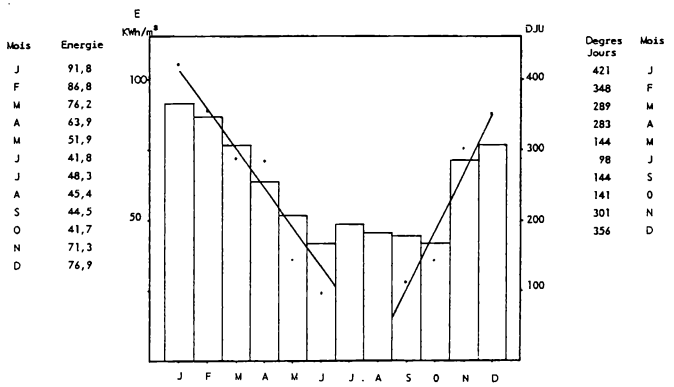
Variations mensuelles de l'énergie éolienne

2. Températures extérieures et énergie éolienne. - On sait que les pertes thermiques d'un bâtiment sont proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.C'est tout au moins l'approximation classiquement utilisée qui ne prend pas en compte divers facteurs tels que précisément la vitesse du vent, la forme du bâtiment en fonction de cette vitesse,etc.

Quoi qu'il en soit, la formule traditionnelle consiste à calculer les pertes thermiques d'un bâtiment, pour un mois donné, comme étant proportionnelles au nombre de degrés-jours du mois (les degrés-jours étant la somme des différences entre les températures extérieures et intérieures -la référence classique étant de 18°C pour ces dernières- sur une période donnée).Il s'avère que la comparaison que nous avons faite des variations mensuelles des degrés-jours avec celle de l'énergie éolienne montre une assez bonne corrélation entre l'énergie moyenne du vent et les besoins de chauffage calculés à l'aide des degrés-jours moyens.

Des comparaisons statistiques beaucoup plus fines seraient à réaliser entre les températures extérieures et l'énergie éolienne pour juger de leur plus ou moins bonne corrélation dans le temps, au niveau des périodes de fluctuations de l'énergie du vent. Cette étude permettrait de mieux juger des stockages nécessaires pour une utilisation optimale du chauffager éolien.

Cependant, cette première indication entre les besoins thermiques des bâtiments, mesurés en degrés-jours, et l'énergie éolienne statistiquement disponible, confirme la bonne relation entre besoins et disponibilité en énergie.



Mois	Energie
J	91,8
F	86,8
M	76,2
A	63,9
M	51,9
J	41,8
J	48,3
A	45,4
S	44,5
O	41,7
N	71,3
D	76,9

Degres Jours	Mois
421	J
348	F
289	M
283	A
144	M
98	J
144	S
141	O
301	N
356	D

Comparaison des degrés-jours unifiés et de l'énergie éolienne

ANGERS

3. Vitesse du vent et déperditions thermiques. - Par contre, il n'est pas besoin d'études statistiques pour confirmer la bonne adaptation du chauffage éolien aux besoins instantanés de chauffage. En effet, les pertes thermiques d'un bâtiment augmentent lorsque la vitesse du vent s'accroît.

Pour un bâtiment donné, le calcul des variations des déperditions en fonction de la vitesse du vent est difficile, sinon impossible, à faire en toute rigueur.Les pertes thermiques sont liées à la convection forcée dépendant directement du vent mais

aussi de la rugosité des parois et de l'épaisseur de la couche limite qui en découle.Les échanges par convection forcée sont proportionnels à la vitesse du vent affectés d'un exposant compris entre 0,5 et 1, selon qu'il s'agira d'un écoulement laminaire ou très turbulent, et à la différence de température entre la surface d'échange et l'atmosphère.

A titre d'exemple, les études sur l'influence du vent sur les déperditions thermiques dans les serres horticoles, réalisées par l'Institut Technique Interprofessionnel de l'Horticulture d'Angers ont montré que la variation du coefficient k global d'échanges thermiques, en fonction de la vitesse du vent, est de la forme : $k=0,8V+6$ pour des serres traditionnelles.Les pertes thermiques varieront donc du simple au double lorsque les vitesses du vent passent de 1 à 9 m/s.

Par suite, bien qu'il ne soit pas possible dans la plupart des cas, de chiffrer de manière théorique la corrélation exacte entre l'augmentation instantanée des besoins de chauffage et l'énergie éolienne disponible, cette corrélation est orientée dans un sens favorable au chauffage éolien.

4. Analyse des séquences de vent. - Il est important de connaître, pour un site donné, le laps de temps moyen durant lequel le vent ne souffle pas afin de déterminer le volume de stockage optimum compte tenu des besoins de chauffage et de l'énergie éolienne produite par la machine.

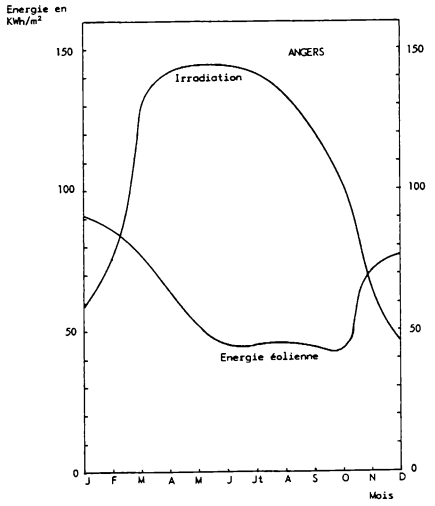
L'analyse des séquences de vent n'a pas encore été faite à partir des données météorologiques et seuls quelques travaux existent en ce domaine. L'Institut de Développement des Ressources Renouvelables (1979) a analysé les données de la station de Perpignan afin de déterminer la probabilité d'occurence des séquences consécutives de vent correspondant à un seuil donné de vitesse.On peut en déduire, pour une éolienne dont on connaît les vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt les probabilités des séquences de production et les quantités d'énergie produites durant ces séquences.

Si la probalité pour que l'éolienne ne produise rien durant n jours, un stockage thermique correspondant aux besoins durant au moins n jours sera nécessaire.Il faudra alors dimensionner la puissance de l'éolienne en fonction des besoins, de telle sorte que la probabilité de production durant les séquences utiles permette d'assurer à la fois la couverture des besoins et le renouvellement du stockage.

5. Energie éolienne et irradiation solaire. - Ainsi que nous le signalons précédemment la disponibilité de l'énergie solaire est relativement faible durant les mois de chauffage.Pour la station d'Angers, par exemple (données de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs des Techniques Horticoles - J. BOCCON-GIBOT - 1982 -) l'énergie solaire moyenne annuelle à Angers, sur un plan horizontal, est de 1245,9 kWh/m². La disponibilité de cette énergie de début Octobre à fin Avril est seulement de 36,7% de cette quantité annuelle; pourcentage qui doit être comparé aux 68,7% d'énergie éolienne disponible durant cette même période.

Une complémentarité intéressante pourrait donc être envisagée entre les chauffages éolien et solaire. Durant les périodes intermédiaires d'automne et de printemps, les quantités d'énergie disponible se complètent. Une étude plus précise, pour chaque site et pour une altitude retenue pour une éolienne, serait donc à faire si l'on envisage un calcul d'optimum économique des investissements éolien et solaire pour le chauffage.

6. Energie éolienne hors de la période de chauffage. - En dehors de la période de chauffage, les besoins calorifiques concernent essentiellement l'eau chaude sanitaire pour les besoins domestiques ou d'autres utilisations de type tertiaire ou industriel. Le pompage de l'eau peut également être envisagé durant la période estivale. En ce qui concerne plus particulièrement le chauffage des serres horticoles, la période classique de chauffage de l'habitat est souvent plus restreinte que celle des serres, couvrant par exemple les mois de Mai et Septembre.



Mois	Energie éolienne KWh/m²	Irradiation* KWh/m²
J	91,3	59,1
F	86,8	75,6
M	76,2	126,3
A	63,9	141,9
M	51,9	144,3
J	41,8	140,4
Jt	48,3	145,5
A	45,4	133,8
S	44,5	118,8
O	41,7	104,4
N	71,3	64,5
D	76,9	45,9

*pour un plan incliné de 45° par rapport au plan horizontal

Comparaison des énergies solaire et éolienne.

ANGERS

III. - TECHNIQUES DE CONVERSION POUR LE CHAUFFAGE. PRODUCTION D'ELECTRICITE

1. Technologies des systèmes de chauffage éolien. - Le chauffage des bâtiments peut être réalisé à l'aide de l'énergie éolienne de diverses manières :

-soit directement à l'aide de résistances électriques formant des convecteurs ou incorporées à la structure même du bâtiment (plancher chauffant par exemple);

-soit en chauffant un fluide caloporteur, qui sera généralement de l'eau, distribué dans le bâtiment.

L'air est moins souvent envisagé comme caloporteur, tout au moins en France, alors que le couplage avec des capteurs solaires à air pourrait être une solution intéressante.Le fréon peut également être utilisé comme fluide caloporteur distribué dans le bâtiment, ainsi que cela a été réalisé et développé par M. SOULAS (1980) pour le chauffage de locaux à usage d'habitation.

Chauffage direct par résistances électriques. -Dans ce cas, l'énergie électrique produite par l'éolienne n'est pas stockée et est utilisée au fur et à mesure de sa production.Cependant, un certain stockage pourrait être envisagé dans la structure même du bâtiment, soit en plancher, soit dans les murs, ce qui améliorerait grandement la bonne utilisation de l'énergie fournie lorsque l'éolienne couvre une part non négligeable des besoins en chauffage.

L'objectif des constructeurs visant ce créneau d'utilisation est de proposer une éolienne avec le minimum d'investissement. Ils préconisent donc l'emploi de l'électricité éolienne pour des habitations déjà équipée d'un système de chauffage. C'est une forme de chauffage en "relève de chaudière".Tous les aérogénérateurs peuvent natrurellement être utilisés à cet effet et la régulation du courant fourni n'est pas nécessaire.

Distribution du chauffage par fluide caloporteur. - Le chauffage du fluide caloporteur peut se faire :

-soit par résistances électriques utilisant ou non un circuit de distribution existant;

-soit à l'aide d'un système mécanothermique, l'énergie éolienne étant transformée directement en chaleur;

-soit par l'intermédiaire d'un système de conversion directe en chaleur par courants de Foucault;

-soit par l'utilisation d'une pompe à chaleur couplée directement ou non sur l'éolienne.

2. Production d'électricité pour le chauffage. - L'utilisation de l'électricité d'origine éolienne peut se faire au fil du vent ou par l'intermédiaire d'un stockage thermique, ce qui permet une meilleure utilisation de l'énergie fournie lorsque l'éolienne atteint une puissance représentant une fraction non négligeable des besoins.

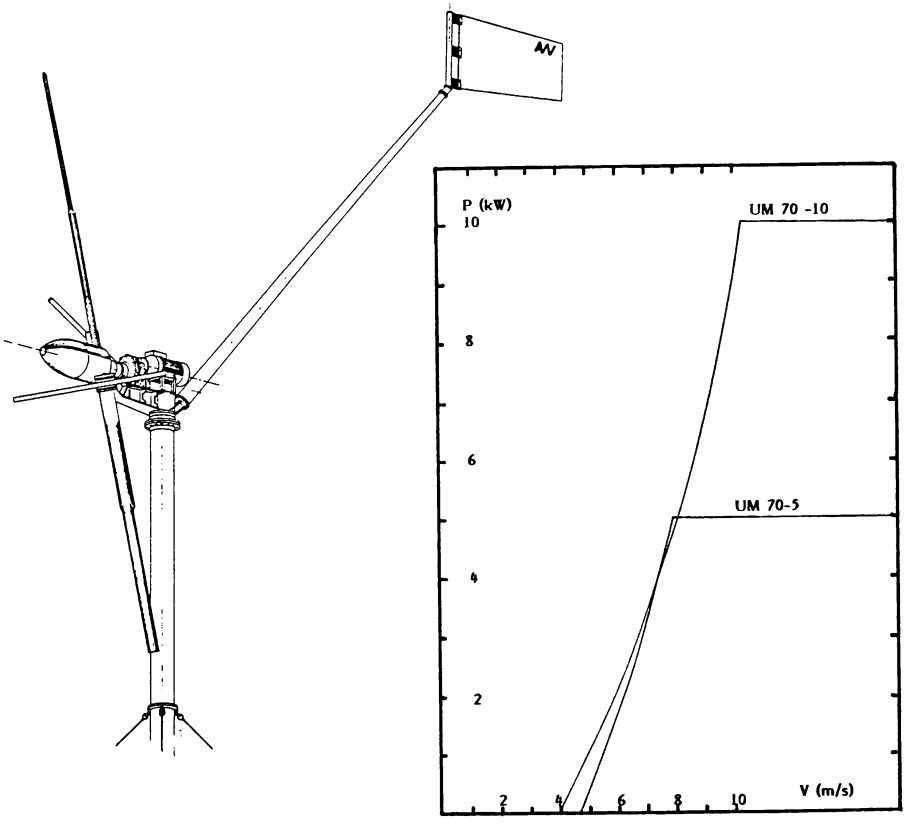
Diverses éoliennes, dites de chauffage, ont été proposées récemment par divers constructeurs. Cette dénomination pourrait être réservée à des modèles fournissant un courant non régulé.

Aérogénérateurs "Aérowatt". - La série UM 70 d'aérogénérateurs Aérowatt a été développée récemment afin de répondre à divers types d'utilisations et en particulier au chauffage de l'habitat.C'est une éolienne de 7m de diamètre ayant, pour le chauffage, une génératrice asynchrone excitée par condensateurs statiques.

Deux puissances nominales sont proposées, correspondant aux niveaux énergétiques du gisement éolien d'un site, à savoir : 5 kW pour une vitesse nominale de vent de 8,5m/s ou 10 kW pour 10,5 m/s.

L'aérogénérateur comporte une hélice bipale à calage variable commandé par la force centrifuge selon la technique d'Aérowatt mentionnée au cours du chapitre portant sur les éoliennes à axe horizontal.La vitesse périphérique des pales s'étage de 60 à 80 m/s environ, selon l'adaptation retenue.

Les pales ont une corde constante et ne sont pas vrillées.Au repos, les pales de l'hélice ont un calage avant important (20°) afin d'assurer un couple de démarrage important. Lorsque les ressorts de démarrage sont complètement tendus, les pales sont alors à leur calage optimal et dans la plage de vitesses de rotation de 0,2 V_n à V_n (vitesse nominale), le calage des pales reste fixe.Le calage optimal est de l'ordre de 1,5° avant. Dans cette plage de vitesse, le calage reste voisin du calage optimal car, dans cette zone de fonctionnement, la vitesse de rotation augmente en même temps que celle du vent naturel, donc le vent relatif reste voisin de l'incidence de rendement maximal.



Courbe de puissance

Aérogénérateur de chauffage AEROWATT - Série U.M. 70 -

Si la vitesse du vent augmente, le calage des pales évolue de 5 à 15° arrière. Il y a régulation par décrochage aérodynamique et stabilisation de la vitesse de rotation à sa valeur nominale avec des variations très faibles, de l'ordre de 5%.

Les pales sont construites en bois. Elles sont constituées par des éléments collés entre-eux avec de la colle Résorcine.Les éléments sont placés de façon que les cernes de croissance s'opposent et choisis de façon que les densités moyennes des pales soient voisines.

Après avois reçu une protection hydrofuge, les pales sont recouvertes d'une couche projetée de polymère de synthèse (uréthane) qui reste élastique, rendant ainsi les pales insensibles à l'érosion, notamment celle des gouttes d'eau.

Le système d'orientation est celui adopté pour toutes les éoliennes Aérowatt, à savoir un système à safran mobile placé en aval du support de l'éolienne.Pour assurer une limitation de la vitesse d'orientation dans les sites où la turbulence latérale est importante, le safran est fixé au gouvernail par des charnières en élastomère qui assurent une limitation du couple d'orientation avec amortissement.

L'ensemble générateur est constitué par le multiplicateur qui adapte le couple de l'hélice à celui de la génératrice électrique dont la vitesse de rotation nominale est élevée.Le poids des machines de chauffage est respectivement de 655 et 720 kg, pour les puissances nominales de 5 et 10 kW.

Les courbes de puissance montrent que les machines commencent à fournir de l'énergie électrique à partir d'un vent de 4 m/s pour l'éolienne de 5kW et de 4,7 m/s pour celle de 10kW.Les vitesses de vent au-delà desquelles les performances nominales des machines sont obtenues, sont respectivement de 8,1 m/s et de 10,4 m/s. Les vitesses de rotation nominale sont de 200 et 225 tr/mn pour les machines de 5 et 10 kW.

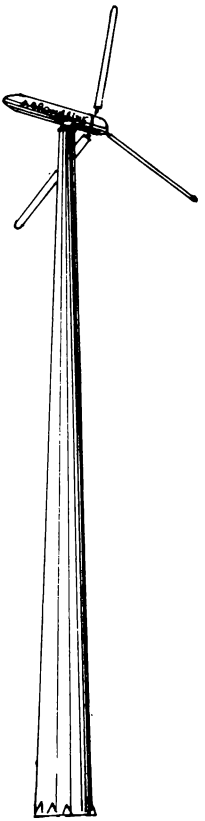
3. Eoliennes "Enag". - Divers modèles à deux ou trois pales sont proposés par la Société Enag, installée à Quimper.Ces éoliennes sont équipées d'hélices à pas variable; les pales sont en tôle d'un alliage d'aluminium (AG3) inoxydable.

Une éolienne de 6m de diamètre, à trois pales, est proposée, entre autres, pour le chauffage éolien.La génératrice est un alternateur ne comportant ni bague ni balai et le rotor est composé d'un bloc d'acier à 16 pôles. Ce type d'alternateur présente une grande robustesse par suite de sa simplicité et commence à débiter pour des vitesses de rotation relativement faibles. Ceci permet de monter le moyeu de l'hélice directement sur l'arbre de l'alternateur donc sans multiplicateur.

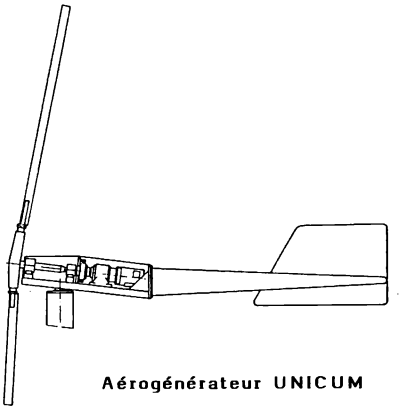
La vitesse de rotation de l'hélice est de 120 tr/mn lorsque l'alternateur commence à débiter et de 280 tr/mn environ à la puissance nominale, délivrant alors une puissance de 6 kW.L'alternateur peut être bobiné pour produire un courant alternatif de 220 ou 380 V, à fréquence variable, ce qui ne pose pas de problème pour le chauffage.

4. Aérogénérateur "Aéroturbine". - Les éoliennes Aéroturbine sont commercialisées actuellement par la Société l'Aérogénérateur Français. Divers modèles sont proposés dont un d'une puissance de 10 kW nominal, comportant une hélice tripale à pas variable.Les pales sont en alliage d'aluminium extrudé; elles sont traitées par une protection anti-corrosion et leur couleur, noir mat, est anti-reflets.

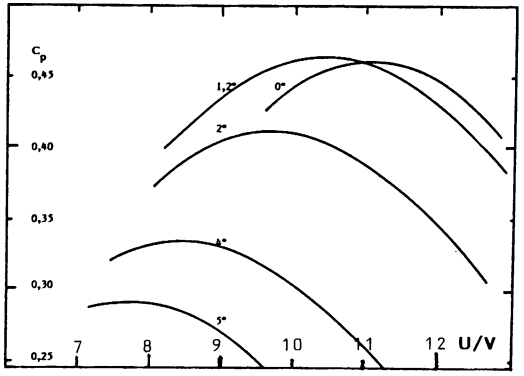
La génératrice est un alternateur de fabrication standard industrielle (Alsthom-Unelec). Ces alternateurs ont une vitesse de rotation importante : 3000 tr/mn pour les alternateurs à deux pôles et de 1500 tr/mn pour ceux à quatre pôles. Ces alternateurs, sans bague ni balais, comprennent essentiellement :



Aérogénérateur AEROTURBINE



Aérogénérateur UNICUM



Facteur de conversion de l'aérogénérateur unicum

Variations de l'angle de calage

-l'alternateur principal à induit fixe et inducteur tournant (roue polaire),

-un alternateur auxiliaire d'excitation à inducteur fixe et induit tournant, produisant un courant alternatif;

-un redresseur qui transforme ce courant alternatif en courant continu pour alimenter la roue polaire.

Le pylône est constitué par un mât autoporteur en tôle d'acier galvanisé pliée. Il est muni d'une charnière à sa base qui permet l'entretien au sol de l'éolienne. Ce mat peut être basculé aisément au moyen d'un vérin hydraulique télescopique permettant à un homme seul d'assurer la maintenance au sol en toute sécurité.La conception et l'esthétique de cette éolienne en font, à notre avis, l'un des meilleurs exemples actuels pour une bonne intégration à l'environnement.

5. Aérogénérateur "Eole 80". - Un seul constructeur français, la société Eole 80, propose actuellement une éolienne de type Darrieus pour le chauffage éolien.

Le modèle actuellement commercialisé comporte des pales formées de trois parties assemblées sur le site : deux bouts droits de deux mètres et un bout circulaire de quatre mètres.La forme de l'ensemble des pales, une fois le montage effectué, se rapproche de la courbe idéale troposkienne.L'éolienne comporte trois pales ainsi constituées; la masse de chacune est de 25 kg. Elles sont formées en matériaux composites comprenant du bois, de la fibre de verre, du polystyrène et de la résine époxy.

Les attaches de pales sont en acier, insérés dans chaque pale sur une longueur de 30 cm; elles sont largement dimensionnées pour prendre en compte les phénomènes de fatigue.

La hauteur des pales est de 5m et le diamètre maximal est également de 5m, soit une surface balayée de 16,5 m^2.Une génératrice de type asynchrone auto-excitée est fixée à la base et entraînée par l'éolienne.La puissance fournie, exprimée en watts, est sensiblement donnée par : $P = 3{,}03\ V^3$, dans une plage de vitesses du vent comprise entre 5 et 11 m/s.Le facteur de conversion est alors de l'ordre de 0,3. La vitesse de rotation varie de 90 à 110 tr/mn suivant la vitesse du vent.

Le mât est un tube en acier de 20 cm de diamètre, d'une masse de 180 kg. Il tourne sur deux roulements coniques. Les attaches des pales sont fixées sur ce mât.

Un tube support maintient le montage des roulements du mât tournant et abrite la transmission et la génératrice.Il est constitué d'un tube en acier de 50 cm de diamètre. Il est équipé d'une trappe de visite placée à hauteur d'homme permettant la réparation et l'entretien. L'ensemble est bridé sur un socle en béton équipé de tiges de scellement.Son poids total est de 240 kg pour une hauteur de 4 m.

La rotation de l'hélice est multipliée par 15 par un multiplicateur à engrenages droits monté sur l'arbre avec un accouplement élastique.La génératrice électrique est montée verticalement; c'est une génératrice auto-excitée d'une puissance nominale de 5kVA. Elle fournit du triphasé en 220/380 volts.

Un frein à tambour, à déclenchement centrifuge, placé directement sur l'arbre de sortie de l'éolienne, arrête celle-ci en cas de sur-vitesse supérieure à 130 tr/mn.

La mise en place de l'éolienne nécessite le coulage d'un massif en béton muni de tirants servant à fixer la machine. Une fouille de 4,5 m^3 (1,5m au carré sur 2m de profondeur) est nécessaire pour la réalisation de ce massif.

6. Aérogénérateur UNICUM. - La société UNICUM vient de lancer sur le marché un aérogénérateur de 7m de diamètre, d'une puissance nominale de 5kW par vent de 9 m/s; un réglage de la régulation permet d'obtenir une puissance nominale de 7 kW. Les pales sont en alliage léger, de profil NACA 23015. L'orientation face au vent s'effectue classiquement à l'aide d'une dérive. L'ensemble est monté sur un pylône tubulaire haubanné, articulé à la base, permettant la maintenance au sol.

IV. - CONVERSION MECANOTHERMIQUE.

Dans ce type de conversion, l'énergie recueillie sur l'arbre du moteur éolien est transformée directement en chaleur par frottements mécaniques d'un fluide caloporteur.L'énergie calorifique est ensuite transportée par des tuyauteries calorifugées vers le bâtiment à chauffer. Un stockage thermique permettra, en général, un meilleur rendement global de l'ensemble.Diverses expériences ont été faites depuis un certain nombre d'années, aux Etats-Unis en particulier, et certaines sont actuellement en cours en France.

1. Intérêt des convertisseurs hydrauliques. - Parmi les systèmes envisageables permettant une conversion mécanothermique, les systèmes utilisant des convertisseurs hydrauliques sont les plus utilisés.Les machines tournantes connues sous le nom de frein à eau ont en effet été longtemps utilisées pour assurer un freinage dépendant de la vitesse, l'énergie mécanique absorbée étant rejetée à l'aide d'un fluide caloporteur. Ils sont en général conçus pour des vitesses élevées de rotation et leur emploi nécessite un multiplicateur.

D'autre part, les coupleurs hydrocinétiques de type traction, par exemple, sont également des machines industrielles courantes et peuvent être utilisées comme frein en bloquant l'arbre secondaire.Ce sont des systèmes servant au couplage entre un moteur thermique ou électrique et un ensemble tournant d'utilisation.

Par suite de l'expérience existante sur ces machines, l'emploi des convertisseurs hydrauliques pour l'énergie éolienne semble poser relativement peu de problèmes d'adaptation.Deux avantages essentiels pourraient jouer en faveur de ce mode de conversion directe de l'énergie mécanique en chaleur :

-son rendement est élevé, en principe très proche de l'unité.

-sa caractéristique de puissance, en fonction de sa vitesse de rotation est parfaitement adaptée à celle des éoliennes.

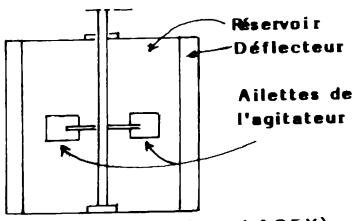
On a vu en effet que la puissance délivrée par une éolienne en fonction de sa vitesse de rotation passe par un maximum pour un vent donné. Le lieu des maxima de puissance est une courbe qui croît comme le cube de la vitesse de rotation de l'éolienne ou, ce qui est équivalent, comme le cube de la vitesse du vent. Or un convertisseur hydraulique comportant des ailettes tournant dans un fluide, possède précisément une caractéristique de puissance croissant avec le cube de sa vitesse de rotation.C'est donc, en principe, un convertisseur idéal pour une éolienne.

D'autre part, la rotation des palettes provoque l'échauffement du liquide avec un rendement égal à l'unité, si l'on néglige quelques pertes mécaniques non récupérées. C'est de plus un système particulièrement fiable du fait de sa simplicité et sa robustesse.

2. Agitateur à palettes. - L'étude de GUNKEL et LACEY (1979-1980-1981) de l'Université Cornell de l'Etat de New-York, porte sur un système expérimental comprenant une éolienne à axe vertical de la société Pinson couplée à un agitateur à palettes contenant de l'eau qui est chauffée par le mouvement de rotation des palettes. La configuration de l'unité de conversion a été étudiée pour sa simplicité, sa facilité de fabrication et sa résistance dans le temps. L'ensemble est formé d'un réservoir cylindrique comportant quatre déflecteurs fixes et un rotor muni de six pales.

Les essais réalisés ont permis de mettre en évidence la compatibilité des caractéristiques de puissance de l'éolienne et de l'agitateur. La puissance de ce dernier s'exprime en effet par une cubique, soit : $P = k D^5 w^3$; où D est le diamètre du rotor de l'agitateur, w la vitesse angulaire et k un paramètre dépendant de la masse spécifique du liquide et des unités choisies.

Une étude du même type a été faite par MATZEN et KOEFED (1979) au Danemark, avec un convertisseur plus complexe.Le système est constitué d'un réservoir de 135 l, de diamètre extérieur 40 cm et de 120 cm de hauteur, dans lequel plonge un arbre lié à un rotor de diamètre 35 cm comportant 6 ailettes tournantes de 30 cm de hauteur, et situées en regard d'un stator comportant 7 ailettes de diamètre identique à celui du rotor.L'espacement entre les ailettes du rotor et du stator est de 12 mm.C'est donc un système assez analogue à un coupleur hydrocinétique.



Agitateur à palettes (GUNKEL et LACEY)

L'expérience montre que l'absorption de puissance par l'agitateur dépend de la pression du fluide dans le réservoir.On obtient une caractéristique cubique lorsque le réservoir est plein, la puissance vérifiant une relation du type :

$$P = k\, D^{5} (N/100)^{3}$$

où D est le diamètre du rotor exprimé en mètre, N la vitesse de rotation en tour par minute, P est la puissance exprimée en kilowatts; k est un coefficient dépendant du convertisseur et égal à 14 pour les dimensions ci-dessus.

La forme de la relation précédente est vérifiée lorsque la hauteur des pales varie.La variation de l'intervalle entre le stator et le rotor montre que la puissance absorbée diminue lorsqu'on augmente le jeu.

Une étude portant sur divers systèmes hydrauliques a été réalisée par DRIVIERE (1980) en France. Après une expérimentation sur un système multiétagé, les travaux portent sur un convertisseur à rotor et stator en vis-à-vis, munis chacun de palettes.Le fluide utilisé est une huile. Une étude systématique des divers paramètres susceptibles d'optimiser le convertisseur montre que :

-il existe une hauteur optimale des ailettes, tant pour le stator que pour le rotor;

-le jeu entre les ailettes n'a qu'une faible influence sur la puissance récupérée et un jeu faible, de l'ordre de 1 à 2 mm est intéressant ;

-l'augmentation du nombre de palettes augmente la puissance absorbée;

-l'augmentation de la température de l'huile augmente sa viscosité et rend moins efficace le convertisseur.L'eau semble donc plus intéressante, pour des températures inférieures à 90°C, car elle possède une viscosité pratiquement constante.

3. Coupleurs hydrocinétiques. - Les coupleurs hydrocinétiques sont des machines industrielles comportant deux rotors, en vis-à-vis, munis chacun d'un nombre élevé de palettes. Leur emploi comme convertisseur d'énergie se fera en bloquant l'un des rotors et en réalisant une circulation d'huile dans le coupleur pour évacuer les calories produites. Ce système étant déjà un produit industriel son prix de revient sera en principe intéressant.

Les tailles des coupleurs sont en général assez réduites ce qui nécessite des vitesses de rotation élevées pour obtenir une puissance importante.L'emploi d'un multiplicateur s'avère donc nécessaire.

Le tableau des puissances en fonction des vitesses de rotation, données par un constructeur (SIME Industrie), montre que l'on a une caractéristique cubique jusqu'à des vitesses de rotation de l'ordre de 1600 tr/mn, pour les coupleurs de faible diamètre, et qu'ensuite la puissance augmente plus lentement. On aurait donc intérêt à utiliser des coupleurs de diamètre relativement important si l'on veut tourner à des vitesses moindres, ce qui augmentera le prix du coupleur. L'optimum économique devra donc être calculé pour l'ensemble multiplicateur/coupleur.

TAILLE DU COUPLEUR EN mm	PUISSANCE EN KW						
	VITESSE MOTEUR tr/mn						
	750	960	1170	1450	1760	2950	3540
185	0,20	0,45	0,75	1,5	3	5	5
235	0,60	1,3	2,3	4,5	9	15	15
270	1,1	2,5	4,5	9	17	28	28
320	2,5	5,5	10	20	38	65	65
370	5	12	22	42	85	130	—
420	10	22	40	80	150	250	—
480	20	40	75	155	300	500	—
584	40	100	175	340	500	—	—
660	80	180	310	600	700	—	—
740	150	350	460				

Tableau des puissances des coupleurs hydrocinétiques SIME INDUSTRIE-Coupleurs traction

V. - CONVERSION PAR COURANTS DE FOUCAULT.

1. Principe de conversion. - Lorsqu'un corps conducteur est placé au voisinage d'un champ électromagnétique variable, il se développe à l'intérieur de celui-ci des courants induits que l'on appelle des courants de Foucault. Ces courants s'opposent au flux qui leur a donné naissance et échauffent le conducteur dans lequel ils se produisent.

Ce phénomène peut être utilisé pour transformer directement l'énergie mécanique recueillie sur l'arbre d'une éolienne en chaleur.Pour cela, un rotor magnétique à aimants permanents est relié à l'arbre.Il se produit une induction tournante qui engendre des courants de Foucault dans un cylindre servant d'échangeur et à l'intérieur duquel circule un fluide caloporteur.Cet appareil permet un rendement élevé de conversion mécanique en chaleur. De plus, l'utilisation d'un rotor sans contact mécanique avec l'échangeur assure une fiabilité élevée du système.

2. Convertisseur à courants de Foucault. - La société "Le matériel magnétique", à Brest, étudie un convertisseur basé sur le principe décrit ci-dessus.Un rotor multipolaire à aimants permanents engendre des courants de Foucault dans les parois métalliques d'un échangeur de chaleur où l'on introduit de l'eau froide qui, après un parcours hélicoïdal au contact des parois, ressort à une température que l'on peut asservir en agissant sur le débit.

L'emploi d'un asservissement de position de l'échangeur, par rapport au rotor magnétique, en fonction de la vitesse de ce dernier, permet d'obtenir une caractéristique cubique de puissance.Le réglage de la variation de puissance du convertisseur, en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne, permet, comme pour le coupleur

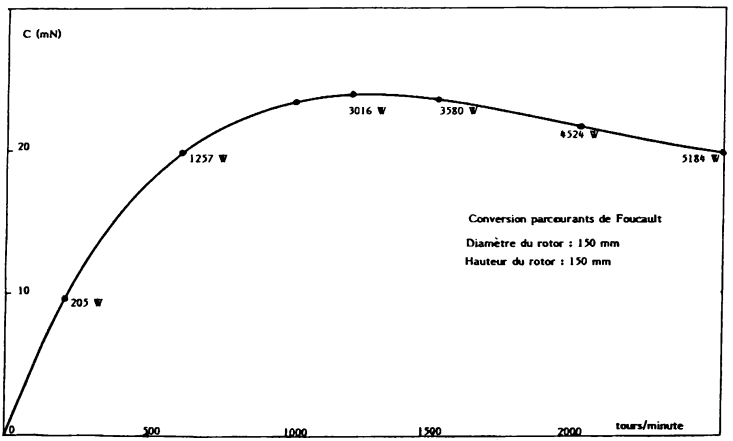
hydrocinétique mais avec une sophistication plus grande, d'obtenir un couplage optimum pour toutes les vitesses de rotation du moteur éolien.

Performances du convertisseur. - Le rendement d'un convertisseur à courants de Foucault est pratiquement égal à l'unité.De plus, plus de 95% de la chaleur du convertisseur est récupérée par le fluide caloporteur lors des essais avec une température de sortie d'eau de 60°C.

Pour une position fixe du stator et un matériau donné, la valeur du couple résistant croît d'abord linéairement, passe par un maximum et décroît ensuite lentement à mesure qu'augmente la vitesse de rotation du rotor.

En augmentant la résistivité de la chemise dans laquelle circulent les courants de Foucault, on constate une augmentation de la vitesse de rotation correspondant au couple maximum, sans que la valeur de ce dernier soit modifiée.La puissance maximale s'en trouve donc accrue.

Pour une vitesse donnée de rotation, le couple et la puissance varient avec la position relative du stator par rapport au rotor.Cette variation est linéaire sauf au voisinage des positions extrêmes où existent des effets de bord.Un dispositif mécanique permet de régler la position du stator, en fonction de la vitesse de rotation du rotor, afin d'obtenir une caractéristique cubique de puissance du convertisseur.



Couple résistant d'un convertisseur à courants de Foucault.

VI. - CONVERSION THERMODYNAMIQUE.

par Marcel SOULAS et Jean HLADIK - Laboratoire d'Energétique Solaire - ANGERS-

L'idée de valoriser l'énergie éolienne à l'aide d'une pompe à chaleur est sans doute assez ancienne puisque l'on trouve déjà un brevet de L. ROMANI en 1948 décrivant une modalité de couplage direct éolienne/pompe à chaleur. Une étude de GALANIS et DELISLE (1973) porte sur la comparaison des systèmes de conversion de l'énergie éolienne parmi lesquels il considère le cas de la pompe à chaleur. Cependant il ne semble pas que, jusqu'à présent, des réalisations expérimentales aient été mises en oeuvre pour mesurer exactement le rendement d'un tel système.

1. Intérêt de la pompe à chaleur pour le chauffage éolien. - Une pompe à chaleur utilise l'énergie interne d'une source froide en élevant son potentiel thermique à un niveau suffisant pour assurer le chauffage d'un bâtiment. Les calories puisées dans la source froide sont "concentrées" à l'aide d'un compresseur qui réalise une élévation de pression du fluide thermodynamique (fréon) qui passe , entre l'entrée et la sortie du compresseur, de la pression p' à la pression p". A cette élévation de pression correspond une augmentation de température qui passe de T', exprimée en degrés Kelvin (°K), à l'entrée du compresseur, à T" (°K) à sa sortie suivant la loi :

$$T'' = T' \, [p''/p']^{(n-1)/n}$$

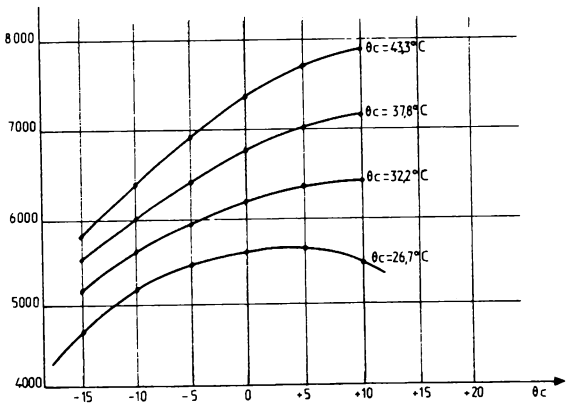
où n est une fonction dépendant du rapport des capacités calorifiques massiques du gaz thermodynamique. Ce dernier se condense dans le condenseur à une température voisine de celles des sources chaudes et transfère sa chaleur Q" au fluide caloporteur alimentant les élements de chauffage du bâtiment.

La propriété essentielle de la pompe à chaleur est de puiser des calories Q' dans une source froide et de restituer une quantité Q" de calories à une température supérieure à celle de la source froide. De plus, si W est l'énergie consommée par le compresseur, le rapport:

$$Q''/W = [Q'+W] \, / \, W = e$$

est supérieur à l'unité. Ce rapport s'appelle le coefficient de performance ou efficacité (e); il peut atteindre des valeurs de l'ordre de 4 pour des conditions optimales de fonctionnement. Dans ce dernier cas, par exemple, cela signifie que la quantité de chaleur fournie par la pompe à chaleur est égale à 4 fois la quantité d'énergie électrique consommée par le compresseur.

Par suite, si W est l'énergie disponible sur l'arbre d'un moteur éolien, on peut espérer obtenir sous forme calorifique une énergie Q" pour le chauffage d'un bâtiment. Cette quantité d'énergie Q" sera égale à W multiplié par le coefficient de performance.



Puissance absorbée par un compresseur de pompe à chaleur en fonction de la température d'évaporation - R22 -N = 1500 tr/mn - (M. SOULAS - "Le chauffage thermodynamique" -Editions Techniques et Scientifiques Françaises - Paris -1980)

2. Couplage optimum éolienne/pompe à chaleur. - La caractéristique de puissance d'une éolienne est une cubique en fonction de la vitesse de rotation. Par suite, le couplage énergétique optimum avec une pompe à chaleur consiste à chercher un système d'accouplement, ou un type particulier de pompe à chaleur, assurant la meilleure cohérence entre les caractéristiques de puissance du moteur éolien et de la pompe à chaleur.

Les diverses possibilités de couplage sont les suivantes :

-électrique avec un aérogénérateur et un compresseur électrique classique;

-mécanique : une liaison par multiplicateur assure la liaison entre l'arbre du moteur éolien et un compresseur ouvert;

-hydraulique : l'entraînement du compresseur se fait par l'intermédiaire d'un système hydraulique;

3. Choix du compresseur.

Compresseurs à piston. - Les compresseurs à piston, hermétiques, semi-hermétiques ou ouverts, sont les plus utilisés dans les machines frigoriques et les pompes à chaleur. Leur rendement est en général excellent puisqu'il peut dépasser 0,9; le rapport de compression s'échelonne entre 2 et 8. La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse de rotation est linéaire entre 500 et 2000 tr/mn, ce qui impliquera, pour un couplage par multiplicateur classique, un fonctionnement non-optimal de l'éolienne. L'emploi d'un multiplicateur non linéaire s'imposerait si l'on veut optimiser l'emploi d'un compresseur à piston.

Compresseurs centrifuges. - Le compresseur centrifuge est analogue par bien des points à une pompe centrifuge. La compression étant généralement polytropique (gaz non parfait, refroidissement non correctement assuré), la théorie montre que l'on obtient une variation de puissance non linéaire. Le couplage au moteur éolien, par l'intermédiaire d'un multiplicateur classique, permettrait alors d'obtenir de meilleurs résultats que l'emploi d'un compresseur à piston.

Des compresseurs centrifuges de grandes puissances existent actuellement (500 à 25 000 kW). Ces compresseurs, s'ils ont l'avantage d'une grande robustesse, présentent certains inconvénients tels le "pompage" (débit minimum au-dessous duquel un régime instable et pulsatoire s'établit) qu'on peut éviter en réalisant un "bypass" entre refoulement et aspiration, système qui abaisse son rendement par rapport à celui d'un compresseur à piston. Des systèmes plus complexes sont utilisés pour des installations de grande puissance (aubage de pré-rotation à inclinaison variable à l'entrée du fluide dans le compresseur).

En conclusion, il est difficile actuellement de se prononcer avec certitude en faveur d'un système de compression ou d'un autre. Une expérimentation devrait permettre de trancher en faveur d'une technologie donnée.

4. Choix du couplage. - Le couplage électrique semble évidemment le plus

simple mais il implique une chaîne de rendements extrêmement défavorable par rapport à celui que l'on obtiendrait à l'aide d'une conversion mécanothermique. Les courbes de réponse des génératrices électriques ne correspondent pas à un bon couplage avec un moteur éolien et de plus, le prix de revient de la génératrice électrique s'ajouterait à celui de la pompe à chaleur. D'autre part, les pertes de rendement, au niveau de la génératrice ne sont évidemment pas récupérables par la pompe à chaleur alors que même les pertes mécaniques pourraient l'être dans un système à couplage mécanique bien intégré.

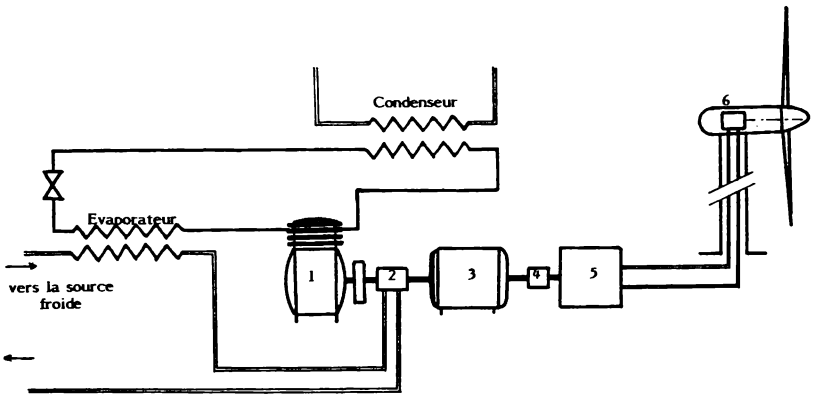
En conclusion, il semblerait que la recherche d'un couplage hydraulique ou mécanique permettrait, d'un point de vue énergétique, une meilleure solution.

5. Couplage hydraulique. - Un prototype de couplage hydraulique est en cours de construction en Loire-Atlantique. Le moteur éolien entraîne directement une pompe hydraulique haute pression (200 bars) qui alimenteà travers un raccord tournant un ou plusieurs moteurs hydrauliques.

Le moteur hydraulique est couplé à un moteur électrique d'entraînement du compresseur par l'intermédiaire d'une roue libre, évitant ainsi l'inversion du circuit hydraulique. Ce moteur électrique permet également de faire marcher le compresseur de la pompe à chaleur sur le secteur en cas d'absence prolongée de vent.

Pour des vitesses de vent importantes, la puissance de l'éolienne sera suffisante pour actionner à la fois la pompe à chaleur et faire fonctionner le moteur électrique en génératrice asynchrone pour la fourniture de courant.

Un ensemble de stockage complète le système de chauffage éolien. La pompe à chaleur utilise l'eau d'un puits comme source froide.



Couplage hydraulique d'une éolienne à une pompe à chaleur.

Projet G. VIAUD - Saint-Etienne-de-Mer-Morte- 1:compresseur - 2: pompe de circulation de l'eau froide - 3: moteur électrique - 4: roue libre - 5: moteur hydraulique - 6 : pompe hydraulique haute pression -

6. Couplage mécanique. - Le brevet de L. ROMANI (1948) envisage un compresseur monté dans la nacelle d'une éolienne à axe horizontal. L'évaporateur puise ses calories dans l'air et se situe également dans la nacelle avec le condenseur. L'évacuation des calories s'effectue à l'aide de tuyauteries calorifugées.

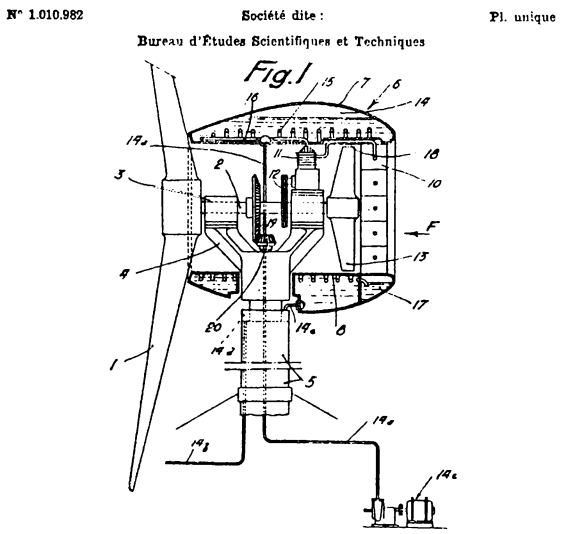
Diverses études de faisabilité nous avaient amené à proposer des systèmes similaires , le couplage mécanique dépendant de l'emplacement retenu pour la pompe à chaleur, en tête d'éolienne ou à la base du pylône. Ce dernier montage s'imposerait si l'on envisage l'utilisation d'une éolienne à axe vertical.

Pour un couplage avec une éolienne à axe horizontal on peut envisager:

-un système à renvoi d'angle et compresseur à la base du pylône;

-un couplage par l'intermédiaire d'un multiplicateur, à rapport fixe ou non, le compresseur étant situé dans la nacelle de l'éolienne.

Une étude de faisabilité plus détaillée est en cours afin de s'orienter vers un système correspondant à un optimum économique, un compromis devant être trouvé entre des données diverses : rendement global de l'installation, disponibilité maximale de chauffage, investissement initial, frais de maintenance.



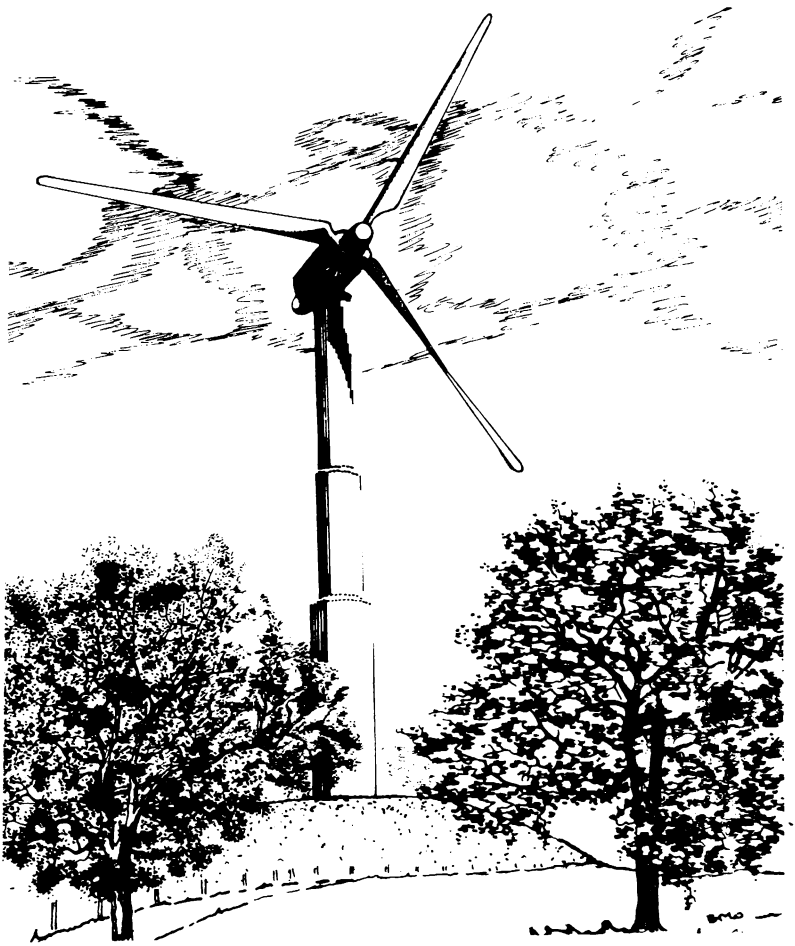
Brevet français n° 1 010 982 (L. ROMANI -1948-)

Projet d'une éolienne couplée à une pompe à chaleur montée dans la nacelle.

VII. - INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE EOLIEN.

1. Chauffage d'un groupe scolaire au Danemark. - L'éolienne de Tvind, au Danemark, est sans doute l'une des plus célèbres des grandes éoliennes dans le Monde car c'est une auto-construction par un groupe d'étudiants et de bénévoles non spécialisés.Une part importante de l'énergie électrique produite par cette éolienne est utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire du groupe scolaire qui a participé à sa construction

Lorsque ce projet d'éolienne commença, en 1975, le Danemark ne possédait pratiquement plus d'éoliennes de production d'énergie.Cinq ans plus tard, le Danemark voyait s'élever un nombre important de petites et moyennes éoliennes et c'est vraisemblablement l'exemple de Tvind qui a accéléré l'évolution en ce sens. Actuellement, le Danemark est l'un des pays le mieux placé au niveau mondial pour exporter sa technologie en matière d'énergie éolienne.



Eolienne de TVIND -Danemark-
La plus grande éolienne de chauffage.

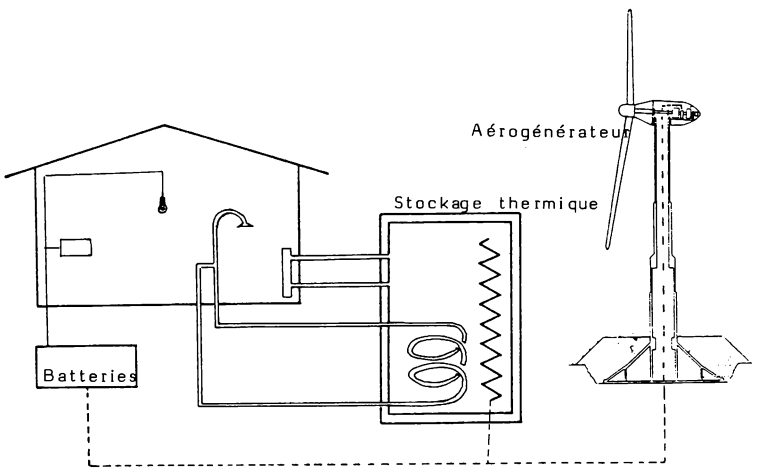
L'éolienne de Tvind. - La tour en béton armé supportant le moteur éolien s'élève à 53 m avec un diamètre de 3 m au sommet et de 5,3 m à la base. L'épaisseur des murs de béton varie de 0,3 à 0,5 m et ils furent coulés dans des formes en bois, de manière continue, de façon à obtenir une homogénéité maximale du béton. La tour est ancrée sur des fondations en béton armé, la base étant de 24 m de diamètre. Au total, 763 m^3 de béton et 160 tonnes de fer d'armature furent utilisés. A l'intérieur de la tour, se trouve un ascenseur pour quatre personnes.

Le moteur éolien comporte un rotor tripale, à axe horizontal, les pales étant en résine époxy armée de fibres de verre. Chaque pale a 27 m de long, une largeur maximale de 2,1 m et pèse 5 tonnes. C'est une éolienne rapide, la vitesse périphérique des pales étant 8 fois celle du vent.Pour un vent de 14 m/s, la vitesse de rotation maximale est de 42 tr/mn. Lorsque le vent augmente, la régulation s'effectue par variation du calage des pales.

La nacelle comportant l'équipement électrique, le multiplicateur et les équipements de sécurité, a une longueur de 15 m et un diamètre maximum de 4,8m. Son poids total, en icluant les pales, est d'environ 115 tonnes.

La génératrice est un alternateur d'une puissance de 2000 kW. Une partie du courant produit est utilisé par le groupe scolaire et le surplus est vendu au service de distribution du réseau national. Une puissance de 450 kW est disponible pour le chauffage des écoles et 400 kW est distribué sur le réseau, l'éolienne n'étant pas actuellement utilisée à sa puissance maximale.

La construction de l'éolienne s'acheva en Mars 1978 et divers essais de fonctionnement furent entrepris. Certaines erreurs furent peu à peu décelées et des améliorations furent apportées; en particulier, le système hydraulique de pivotement des pales fut changé.



Utilisation de l'énergie fournie par l'éolienne de TVIND

Eclairage-Chauffage des bâtiments- Eau chaude sanitaire-

L'excédent de la production électrique est vendue au distributeur national.

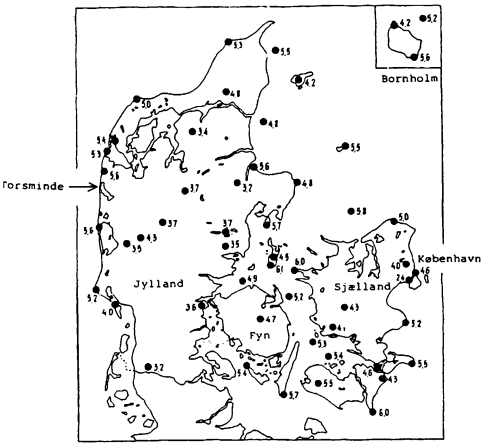
Utilisation de l'énergie produite. - La production énergétique moyenne est donné sur le schéma joint ainsi que les besoins énergétiques du groupe scolaire. La production annuelle est de l'ordre de 2.10^6 kWh et la consommation énergétique des écoles de $1{,}6.10^6$ kWh; les besoins ne sont pas couverts complètement durant la période hivernale.

A titre d'exemple, on donne le bilan énergétique de la production de l'aérogénérateur durant la semaine du 12 au 18 Mars 1980 :

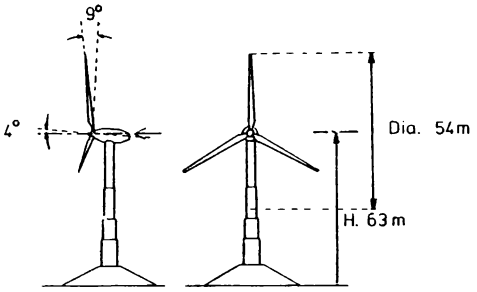
-éclairage et chauffage électrique direct du groupe scolaire : 15 000 kWH;
-eau chaude produite pour le chauffage et l'eau sanitaire : 12 000 kWH;
-électricité vendue à la compagnie de distribution : 12 000 kWh.

Un complément de chauffage au fuel a été nécessaire, durant cette même semaine, pour le groupe scolaire, et il correspond à 28 000 kWh.

Tests de performances. - Une étude réalisée par JENSEN et BJERREGAARD (1980) sur l'éolienne de Tvind a montré que d'importantes vibrations ont lieu lorsque la fréquence des pales (égale à 3 fois la fréquence de rotation, soit 1,08 hertz) devient presque égale à la fréquence de résonnance des pales qui est de 1 hertz.Ce phénomène limite la vitesse de rotation qui est au maximum de 42 tr/mn.La puissance mesurée est de 335 kW pour un vent de 8,5 m/s ce qui correspond à un facteur de conversion de 0,4.

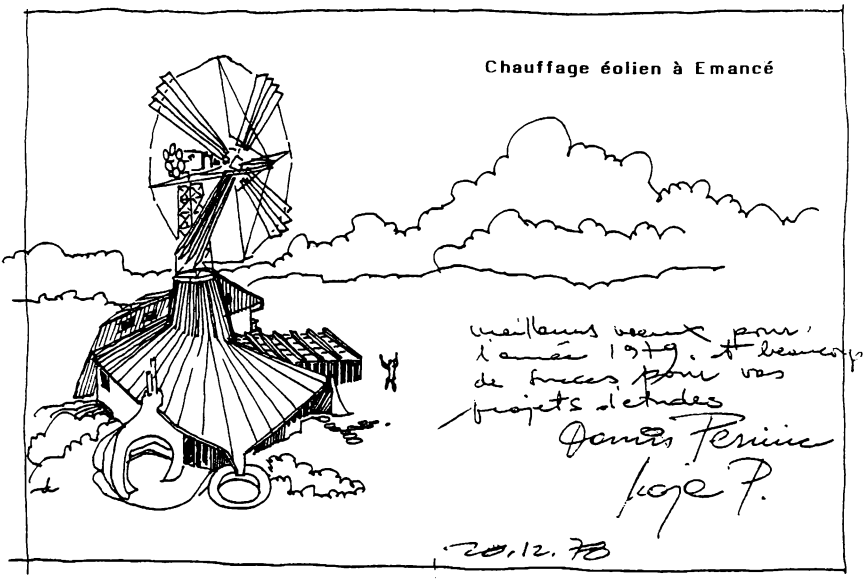


Carte des vitesses de vent moyen annuel au Danemark- à 10m au-dessus du sol.
Pas tellement plus de vent qu'en France



Eolienne de TVIND - Caractéristiques principales.

2. Chauffage éolien d'une maison à Emancé (78120). - Cette réalisation est sans doute le premier exemple, en France, d'un projet d'utilisation de l'énergie éolienne pour le chauffage d'une habitation avec conversion mécanothermique. Dans le projet initial, une éolienne lente à axe horizontal était prévu, entraînant un alternateur triphasé en 380V. Une éolienne à axe vertical a été envisagé par la suite.Cette réalisation a été prise partiellement en charge par le COMES et le Plan Construction.



Première maison française conçue pour le chauffage éolien
Architecte : Damir PERINIC - Projet initial avec éolienne lente à axe horizontal.
Carte de voeux adressée à l'auteur.

La conception de cet habitat est exemplaire à de nombreux egards car elle intègre parfaitement le pylône de l'éolienne dans la structure du bâtiment; de plus, elle met en oeuvre simultanément une utilisation de l'énergie solaire directe par capteurs et serres intégrés à l'habitat.Enfin, l'emploi de pompes à chaleur permet une valorisation des énergies récupérées à bas niveau de température.

Le chantier, qui devait être achevé en 1980, a pris du retard par suite des changements techniques et des essais sur l'éolienne à axe vertical construite par G.GAL. De plus, de nombreux problèmes ont eu lieu pour l'obtention du permis de construire.Celui-ci a été accordé, dans un premier temps, non sans mal, mais la municipalité, hostile au projet, a, par la suite, intenté un recours auprès du Tribunal Administratif.Après trois années, le jugement a été rendu en Mars 1981, en faveur du maître d'ouvrage, et peut-être fera-t-il jurisprudence.L'un des points litigieux était en effet la hauteur de l'habitation; or le tribunal administratif a admis que le propriétaire n'habiterait pas dans l'éolienne, qui dépasse du faîtage, et que seul ce faîtage devait entrer en ligne de compte pour le calcul de la hauteur d'habitation.

Dans cette installation, l'énergie mécanique fournie par l'éolienne est transformée en chaleur par un convertisseur à huile du type coupleur hydrocinétique.Le stockage des calories s'effectue dans un réservoir en acier inoxydable de 16 000 litres (citerne de camion). Un premier échangeur, dans lequel circule l'huile du convertisseur, chauffe l'eau du stockage. Un second échangeur, placé à proximité du premier, est utilisé pour le chauffage de l'eau sanitaire.La distribution du chauffage dans les pièces

de l'habitat se fait par circulation forcée de l'eau du stockage dans des radiateurs en fonte.Cette réalisation a été décrite dans "Les cahiers techniques du bâtiment" (1980) et dans "Solaire 1 Magazine" (1981).

Le site d'implantation ne correspond pas à des conditions particulièrement favorables.Pour la station météorologique la plus proche, celle de Trappes, la vitesse moyenne annuelle du vent est de 3,85 m/s. L'énergie disponible en février, par exemple, est de 150 kWh/m² et en août, de 40 kWh/m². L' amortissement de l'installation ne pourra donc pas se faire sans doute sur moins d'une dizaine d'années ce qui, à notre avis, n'aurait rien d'excessif.

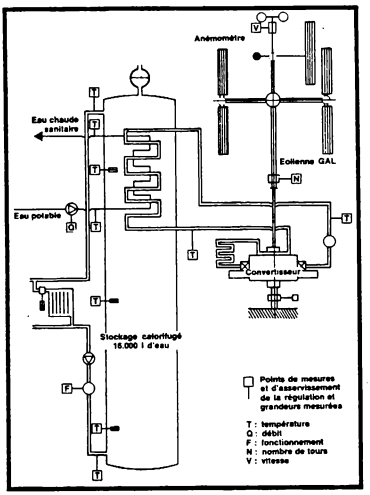
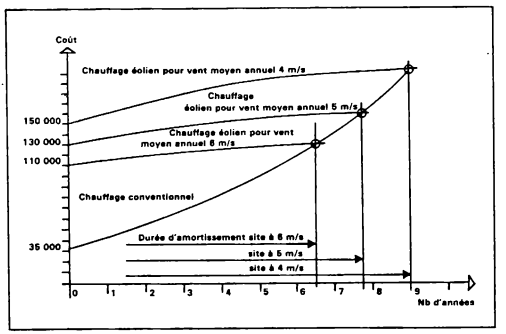


Schéma de l'installation du chauffage éolien à Emancé



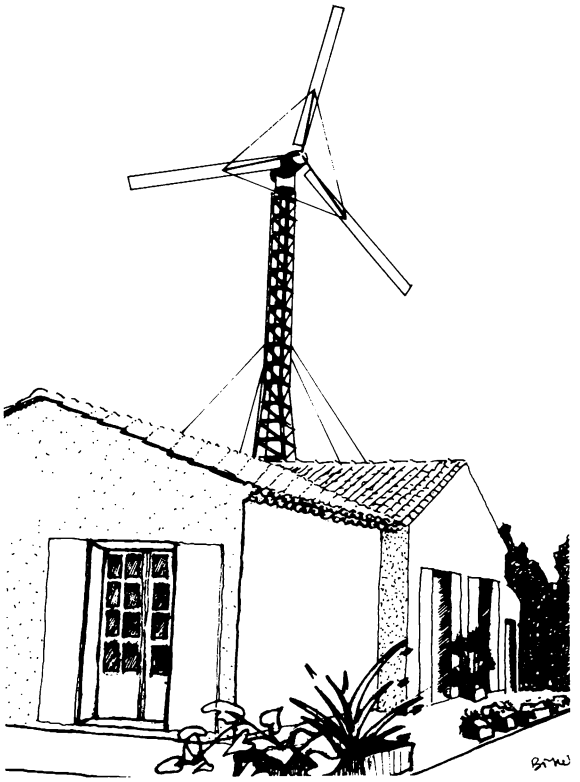
Durée théorique d'amortissement du chauffage éolien à Emancé.

(Documentation : Cahiers Techniques du Bâtiment - N°31- Nov. 1980)

3. Chauffage d'une maison en Loire-Atlantique. - Une installation de chauffage éolien est en cours de réalisation à Saint-Etienne-de-Mer-Morte.A l'origine, une éolienne à axe vertical a été envisagée pour le couplage à un convertisseur hydrocinétique mais une réalisation avec une éolienne à axe horizontal a finalement été mis en oeuvre.

L'éolienne de 12,6 m de diamètre est couplée, par l'intermédiaire d'un multiplicateur, à un convertisseur mécanothermique placé dans la nacelle de l'éolienne. Des tuyauteries bien calorifugées transportent les calories vers un réservoir de stockage muni d'un échangeur. La circulation de l'eau du stockage s'effectue dans des radiateurs situés dans les différentes pièces à chauffer. L'eau chaude sanitaire est obtenue à l'aide d'un échangeur situé dans la partie haute du stockage.

Cette réalisation est, à notre connaissance, la première expérience de ce type où le couplage de l'éolienne et du convertisseur soit réalisée en tête de l'éolienne. Seul un système étudié par ROLLAND (1979) aux Etats-Unis est similaire à cette réalisation.



Eolienne à conversion mécanothermique -Saint-Etienne-de-Mer-Morte-

Utilisation d'un coupleur hydrocinétique - G. VIAUD -

Eolienne de 12,6m de diamètre- Coupleur dans la nacelle -

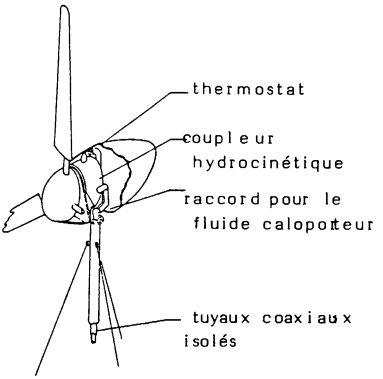
4. Expérimentations aux Etats-Unis. - Dès 1973, des chercheurs de l'Université du Massachusetts (GOWAN, DARKAZALLI et HERONEMUS - 1975) commencèrent l'étude d'un projet pour démontrer l'intérêt du chauffage d'une habitation en combinant l'énergie solaire directe et l'énergie éolienne. Une comparaison théorique des performances de différents types de conversion a été réalisée par GALANIS et DELISLE (1973). Par la suite, SEXTON (1978) compare les performances du chauffage éolien par conversion électrique ou mécanothermique. Les travaux de GUNKEL et LACEY (1979-1980-1981) ont été mentionnés précédemment.

L'étude expérimentale réalisée à l'Université du Massachusetts consiste en une maison comportant à la fois des capteurs solaires et une éolienne. Le stockage est enterré sous la maison et comporte un chauffage de l'eau par un échangeur relié aux capteurs solaires et une résistance électrique connectée à la génératrice de l'éolienne.

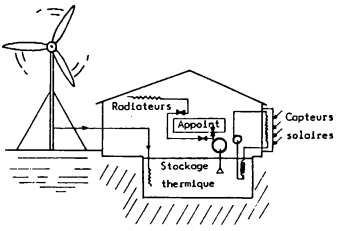
L'aérogénérateur utilisé a un diamètre de 9,9 m et comporte un rotor tripale. Le support haubanné de 18,3 m est en acier. La machine produit 25 kW pour un vent de 11,6 m/s.La vitesse du vent lors du démarrage est de 2,7 m/s et celle d'arrêt

de la machine est de 22,4 m/s. L'éolienne a produit de l'énergie pour l'habitat depuis novembre 1977; le fonctionnement a été entièrement automatique et sans incident.

Une étude économique du chauffage éolien de l'habitat a été faite à partir des résultats expérimentaux pour diverses valeurs du vent moyen annuel.La fraction de chauffage éolien devient significative à partir d'un vent moyen de l'ordre de 3,6 m/s.



Eolienne à conversion thermomécanique
(ROLLAND -1979)



"Wind Furnace"-Chauffage couplé-
Energies solaire et éolienne

VIII. - MODELISATION DU CHAUFFAGE EOLIEN.

1. Couverture des besoins de chauffage. - La détermination de la fraction de chauffage couverte par les apports énergétiques d'une éolienne est relativement simple dans son principe bien qu'elle puisse nécessiter de laborieux calculs si l'on veut procéder de manière assez fine.

Le comportement d'une installation de chauffage éolien, couplée à un appoint classique, consiste simplement à calculer les apports éoliens, le complément de chauffage étant fourni à la demande. La couverture complète des besoins de chauffage par un système éolien est plus difficile à optimiser par suite de l'irrégularité des vents et des besoins fluctuants de chauffage en fonction des températures extérieures. Pour un site ayant des vents locaux réguliers et des beoins en chauffage relativement constants, une analyse mensuelle du couplage entre la fourniture d'énergie éolienne et les besoins en chauffage est suffisante. Dans le cas de vents très irréguliers, et de fluctuations importantes des besoins de chauffage, une analyse heure par heure des interactions entre le système éolien, le stockage et les besoins de chauffage s'avère nécessaire.

Pour une détermination approximative d'un chauffage éolien, réalisée mois par mois par exemple, la modélisation nécessitera :

-la connaissance du régime des vents au cours des mois de chauffage. Une évaluation moyenne pourra être faite en déterminant la fonction de distribution de Weibull pour chaque mois;

-la détermination des paramètres relatifs à l'éolienne choisie : vitesse de démarrage, puissance et vitesse nominales, vitesse de mise hors service. On pourra alors déterminer la fourniture énergétique mois par mois à l'aide de la distribution de Weibull;

-le calcul des besoins de chauffage du bâtiment considéré en déterminant le coefficient B de la nouvelle règlementation thermique. Le calcul se fera mois par mois en utilisant, par exemple, la méthode C.S.T.B.

La comparaison entre les besoins mensuels et l'énergie disponible en sortie d'éolienne permettra de déterminer, en première approximation, les pourcentages de couverture des besoins par le système éolien, pour chaque mois.

La plupart des calculs réalisés par divers auteurs, à l'aide des moyennes annuelles, doivent être sérieusement pondérés afin de prendre en compte les variations d'une année sur l'autre, de l'énergie éolienne.

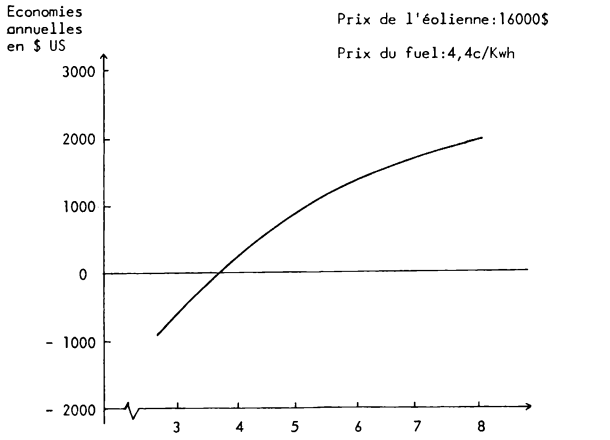
Si la fraction éolienne de couverture des besoins de chauffage est faible, en moyenne, les apports éoliens lors des années bien ventées seront correctement utilisés. Par contre, si la couverture est importante, 80% en moyenne par exemple, une fraction de l'énergie éolienne sera éventuellement excédentaire certaines années.

2. Exemples de modélisation - Diverses études donnant la couverture de besoins de chauffage par l'énergie éolienne ont été réalisées, en particulier aux Etats-Unis. Une récapitulation a été faite par CROMACK, GOWAN et HERONEMUS (1980) sur les travaux réalisés dans diverses universités américaines. Un modèle est repris dans l'ouvrage "Wind Energy" publié par "The Franklin Institute Press" (1978). L'étude de CLAUSIN a été publiée dans "Les Cahiers Techniques du Bâtiment" (Juin 1979).

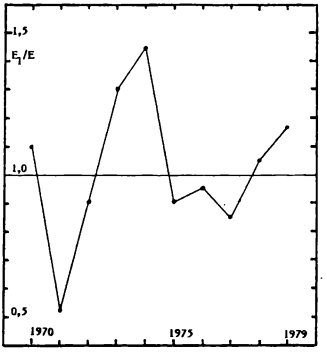
Dès 1973, des chercheurs de l'Université du Massachusetts ont élaboré le projet "Wind Furnaœ" pour démontrer la faisabilité du chauffage d'une résidence en utilisant un chauffage combiné solaire/éolien. L'étude économique du système a été faite pour diverses valeurs du vent moyen annuel. La figure représente les résultats pour une résidence de la Nouvelle-Angleterre. Les économies financières annuelles sont calculées pour un coût d'investissement de 16 000 dollars pour l'éolienne. Les paramètres économiques utilisés ont été les suivants :taux d'intérêt bancaire 9%; taux d'inflation : 6% ; augmentation annuelle du coût de l'énergie : 8% ; durée de vie du système : 20 ans ; durée de l'emprunt : 20 ans ; coût de la maintenance 0,85 % de l'investissement initial ; taux de déduction d'imposition sur le revenu personnel du propriétaire de l'éolienne : 30%. Les résultats économiques donnés

par la courbe ci-après doivent donc être interprétés en tenant compte de ces paramètres économiques. En particulier, la déduction d'une partie de l'investissement éolien des revenus du propriétaire pour le calcul de ses impôts est un élément important et ce serait un exemple à suivre en France si l'on désire réellement promouvoir une politique de développement des énergies nouvelles. Les déductions actuellement possibles en France pour les systèmes éoliens sont en effet bien trop faibles comparées aux investissements à long terme que nécessitent toutes les techniques d'utilisation des énergies renouvelables.

3. Déduction fiscale pour le chauffage éolien. - Un bilan économique pour le chauffage éolien peut, dès à présent, prendre en compte la déduction fiscale autorisée actuellement en France sur les revenus pour le calcul de l'impôt. Depuis le 1er Janvier 1982, il est en effet possible de cumuler la déduction au titre des intérêts d'emprunts d'accession à la propriété avec une nouvelle déduction de 8 000 francs, plus 1 000 francs par personne à charge, au titre des dépenses engagées pour utiliser les énergies renouvelables. Cette disposition s'applique en particulier pour les éoliennes de chauffage. Cette somme, bien qu'elle soit dans son principe un premier pas fait pour le développement des énergies renouvelables, est évidemment très insuffisante pour réellement inciter les particuliers à investir dans le domaine du chauffage éolien.



Economies financières annuelles du chauffage éolien en fonction de la vitesse moyenne du vent. "Wind-Furnace"-



Variations inter-annuelles de l'énergie éolienne à MARIGNANE-E:énergie moyenne

CHAPITRE XI
Production d'électricité

I. - LES USAGES DOMESTIQUES.

1. Besoins domestiques. - La production d'électricité pour la satisfaction de besoins domestiques individuels est un objectif limité par le prix de revient final du kilowatt-heure électrique produit. En effet, au prix de revient de l'éolienne s'ajoute celui du stockage par accumulateurs électrochimiques ainsi que celui de l'appareillage électrique éventuel de conversion du courant continu stocké en courant alternatif.

Cependant, le choix de l'auto-production peut être cohérent si :

-les besoins sont limités ce qui peut être le cas d'un choix de mode de vie ou de besoins secondaires : caravane, chalet isolé en montagne,etc;

-le réseau de distribution est éloigné et demande un raccordement onéreux.

L'existence d'appareils électriques en courant continu, ou intégrant un système de conversion continu/alternatif, et à faible consommation permet, actuellement, de mieux concevoir l'emploi de l'énergie éolienne pour certains usages domestiques

Eclairage. - Les tubes fluorescents peuvent être avantageusement utilisés car ils ont un bien meilleur rendement que les lampes à incandescence classiques. Des réglettes fluorescentes, à allumage instantané et fonctionnant sous 12 ou 24 volts sont proposées sur le marché.

Des réglettes lumineuses emploient des tubes fluorescents classiques, à haut rendement lumineux, qui sont alimentés par des convertisseurs statiques inclus dans le corps de la réglette. Par exemple, une réglette fluorescente consommant une puissance de 18 watts donne un éclairage de 1400 lumens équivalent à celui fourni par une lampe à incandescence d'une puissance de 100 watts. Les puissances des réglettes s'échelonnent de 8 à 36 watts, permettant un choix analogue à celui des lampes traditionnelles.

Le calcul de l'énergie électrique nécessaire, donc le choix de la capacité des accumulateurs correspondant à la puissance choisie et à la durée d'éclairement, est aisé à faire. Par exemple, pour une réglette de 18 watts fonctionnant 3 heures par jour, on aura besoin d'une énergie de 54 watts-heures par jour.

Réfrigération. - La conservation de certaines denrées alimentaires ou de produits pharmaceutiques (vaccins, insuline) peut se faire en utilisant des réfrigérateurs équipés d'une unité frigorifique hermétique alimentée en 24 volts par un onduleur.

La société LEROY-SOMER commercialise un réfrigérateur à haut rendement qui est alimenté par des batteries au plomb, 24 volts, 150 Ah. Le volume intérieur est de 220 litres; la caisse est entièrement en polyester spécification alimentaire. La porte est horizontale afin de limiter les déperditions et l'isolation est de 13 cm de polyuréthane. La température de réfrigération est réglable de -10 à 10°C par thermostat. Le compresseur est alimenté par l'intermédiaire d'un onduleur en 24V.

La consommation d'énergie dépendra de la température intérieure de consigne et de la température extérieure. Pour une température intérieure de l'ordre de 0°C et une conservation sans ouverture, un réfrigérateur de 200 l consomme environ 200 Wh/jour pour une température extérieure de 20°C et 370 Wh/jour pour 40°C. Pour 2 kg de charge moyenne par jour et 20 mn d'ouverture journalière, ces derniers chiffres sont à multiplier par un coefficient d'environ 1,4.

Autres utilisations. -Les puissances de consommation d'autres petits appareils électro-ménagers peuvent être les suivantes :

-magnétophone à cassette : 10 à 30 watts.
-télévision 30 cm en noir et blanc : 18 à 25 watts;
-ventilateurs : 10 à 40 watts
-circulateur pour chauffage : 35 watts;
-outillage électrique : 400 à 1000 watts;

Un exemple d'autonomie de consommation électrique est celui de l'architecte Michel GERBER, installé à Treilles (Aude), connu pour ses réalisations dans l'habitat solaire bioclimatique.Il utilise un aérogénérateur de 1,5 kW de marque ELEKTRO. L'énergie est stockée dans des batteries au plomb ayant une capacité de 650 Ah en 24 volts. Les éléments à faire fonctionner sont les suivants : un récepteur radio; une chaîne Hi-Fi : 100W; un outillage électrique demandant une puissance maximum de 1kW. Il est intéressant de noter que cette maison isolée, en milieu rural, pouvait bénéficier d'une aide de la Direction Départementale de l'Agriculture pour financer son raccordement au réseau EDF; cette prime à été versée au propriétaire et venait ainsi en déduction de ses frais d'électrification autonome.

2. Le stockage par batteries. - Une mise au point sur les divers types d'accumulateurs, leurs techniques de charge et d'emploi a été faite par l'auteur (J. HLADIK "Les accumulateurs électriques" P.U.F. Collection "Que Sais-Je?" -1977).

Pratiquement seuls les accumulateurs au plomb sont utilisés pour le stockage de l'électricité à usages domestiques, par suite de leur prix de revient inférieur aux autres types de batteries et de leur bon rendement en énergie.

Le rendement en énergie est le rapport entre l'énergie restituée à la décharge et celle absorbée durant la charge. Ce rendement dépend de son régime de charge et de décharge; il est de l'ordre de 0,70 à 0,85 dans les meilleures conditions pour un élément au plomb.Pour les batteries alcalines, accumulateurs au nickel-fer, le rendement varie entre 0,50 et 0,60. L'élément au cadmium-nickel a un rendement de l'ordre de 0,70, pour des types traditionnels, mais son prix de revient est plus élevé que celui de l'élément au plomb.

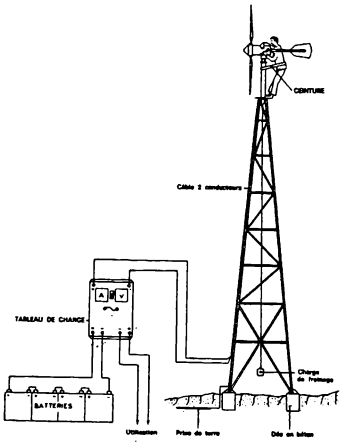
Les énergies massiques obtenues pratiquement avec des accumulateurs commerciaux sont approximativement les suivantes pour une décharge en cinq heures :

-élément au plomb, plan ou tubulaire : 35 Wh/kg;tension d'utilisation: 1,9V.

-élément nickel/fer : 28 Wh/kg; tension d'utilisation : 1,2 V.

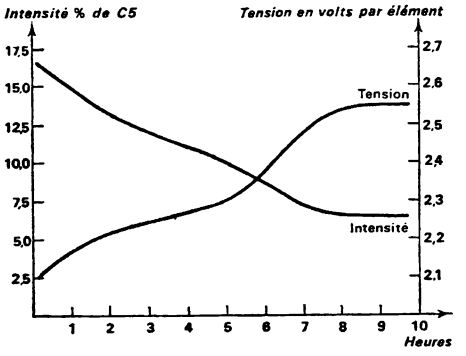
La longévité des accumulateurs dépendra de nombreux facteurs tels leur mode de fabrication, la rapidité de charge et de décharge, la profondeur de décharge,etc. Pratiquement il vaudra mieux choisir des accumulateurs de type fixe de préférence aux batteries utilisées pour l'automobile. L'auto-décharge des accumulateurs au plomb est accélérée par les impuretés, en particulier l'antimoine, et on aura intérêt à utiliser des batteries à plaque épaisse et faible teneur d'antimoine.

La charge des batteries se fera en utilisant un système de régulation afin de limiter automatiquement la charge. Une protection contre une décharge excessive des batteries est nécessaire, coupant automatiquement l'utilisation des batteries, car leur durée de vie dépend fortement de la profondeur de décharge. Il faudra donc choisir une large sur-capacité par rapport aux besoins si l'on veut obtenir un nombre de cycles de charge/décharge important.



Installation d'un aérogénérateur

ENAG



Charge à régime dégressif d'une batterie au plomb

J.HLADIK "Les accumulateurs électriques"
Presses Universitaires de France - Paris - 1977

II. - LES PETITS AEROGENERATEURS.

1. Aérogénérateurs français. - Deux constructeurs français ont une antériorité certaine sur le marché des aérogénérateurs, ce sont les sociétés Aérowatt et Enag. Depuis quelques années, d'autres constructeurs se sont intéressés à ce marché et proposent divers modèles. Des artisans proposent également quelques modèles de petite et moyenne puissance.

De manière générale, les performances des aérogénérateurs français sont médiocres comparées à celles de leurs homologues étrangers sans même parler des prix qui sont plus élevés en France. Le Centre d'Essais de Lannion devrait permettre de mettre en évidence cette disparité à la fois technique et économique vis-à-vis de l'étranger ce qui permettrait d'améliorer rapidement la technologie française.

Société AEROWATT. - Cette société propose essentiellement des aérogénérateurs d'un même type : hélice bipale en alliage d'aluminium, calage variable, orientation par gouvernail dont la partie active est placée hors du sillage de l'hélice. Conçues pour travailler dans des conditions difficiles (alimentation des phares et balises), ces machines sont très chères. Un modèle récent, la série UM 70, est conçu pour les usages domestiques et est équipé de pales en lamellé collé.

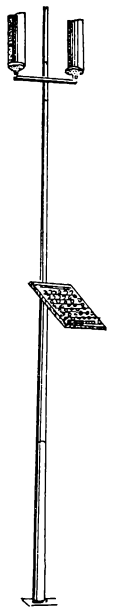
Ces machines sont conçues en général pour trois vitesses nominales : 5 m/s pour sites peu ventés; 7 m/s pour sites moyens; 10 m/s pour sites ventés. Toutes les pièces ayant une usure mécanique sont calculées pour une durée d'au moins 100 000 heures de fonctionnement au régime nominal, soit une durée d'utilisation estimée au moins à 15 ans et plutôt 20 ans sur un site moyen.

Société ENAG. - Cette société propose divers modèles d'aérogénérateurs bipales de petite puissance.Plus récemment, des modèles tripales, d'une puissance de 4 à 9 kW nominale, ont été mis sur le marché.

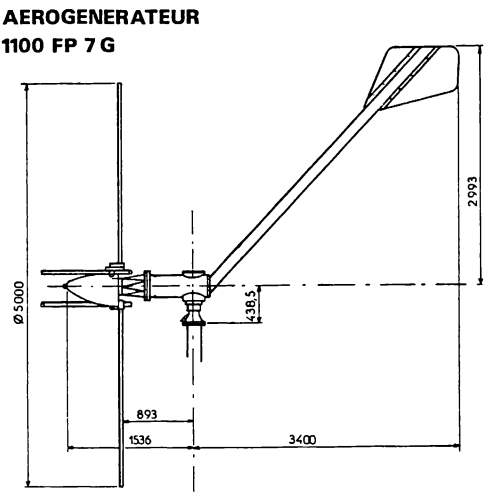
Les pales sont en tôle d'alliage d'aluminium; le moyeu de l'hélice entraîne directement l'arbre de l'alternateur qui comporte un nombre élevé de pôles. Un modèle est proposé, pour le chauffage en tension et fréquence variables.

Société HUMBLOT. -D'abord spécialisée dans la fabrication des éoliennes de pompage, cette entreprise propose une quinzaine de modèles d'aérogénérateurs dans une gamme allant de 25 à 5000 watts. Les aérogénérateurs Humblot ont un rapport de multiplication qui est ajustable par paliers amovibles et pignonerie interchangeable.

Socété AEROTURBINE. - Les modèles proposés comportent une hélice tripale en alliage léger extrudé à calage variable; l'hélice est auto-orientable. Divers modèles sont proposés avec des puissances nominales qui vont de 10 à 25 kW, pour des hélices de l'ordre de 8 à 10 m. Un pylône de 15 m est proposé par le fabricant et constitué d'un fût en deux parties emboîtables pouvant basculer sur une embase en acier grâce à un vérin. Cet aérogénérateur est actuellement en cours d'essais au Centre National de Lannion.



Deux éolienne PROENGIN
Couplage avec photopiles



Aérogénérateur AEROWATT

Société UNICUM - Cette entreprise propose un aérogénérateur à hélice tripale, d'un diamètre de 7 m; les pales sont formées d'un alliage léger et recouvertes de résine renforcée de fibres de verre. Si les prix prévus par le fabricant se maintiennent, ce sera l'un des aérogénérateurs le meilleur marché pour la puissance annoncée.

Société EOLEC. - Le modèle proposé par ce constructeur comporte un rotor bipale de 7,6 m de diamètre. Les pales sont en fibres de verre et résine; elles sont très étroites et doivent être lancées par un démarreur; la régulation se fait par variation du plan de rotation des pales par rapport à l'horizontale. Un pylône auto-basculant de 12 m de hauteur est proposé.

Société EOLE 80. - Le seul fabricant d'éoliennes de type Darrieus propose une modèle ayant des pales de 5 m de diamètre couplées à une génératrice.(voir chauffage éolien).

Société PROENGIN. Deux modèles d'éoliennes Savonius sont commercialisés et et conviennent plus particulièrement pour des besoins extrêmement réduits. (voir le chapitre éoliennes à axe vertical).

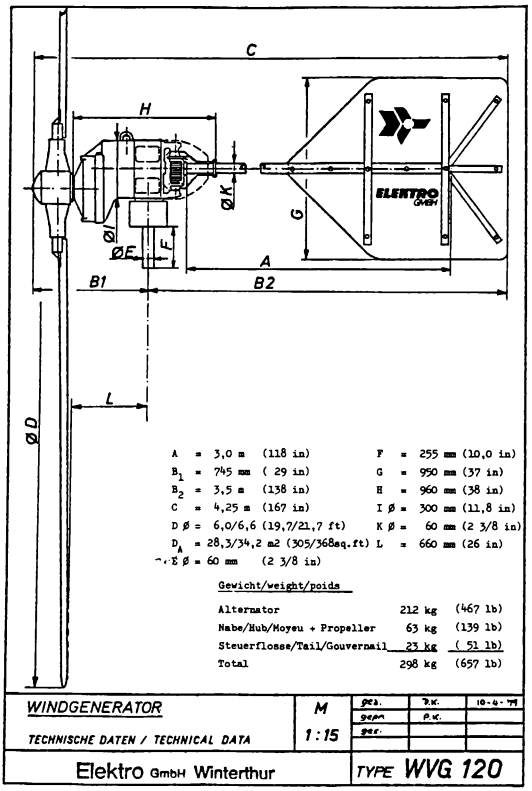
Aérogénérateurs divers. - La société Duranteau (La Roche sur Yon) fabrique des éoliennes de 6 m de diamètre ayant des pales en lamellé collé; la régulation sefait par calage variable. C'est un exemple d'artisanat local qui s'est sans doute développé en France en de nombreux endroits. Le montage de petites éoliennes peut en effet se faire en de multiples petits ateliers mais il semblerait souhaitable que les éléments essentiels,pales, système de régulation,multiplicateur, soient de qualité industrielle.

2. Aérogénérateurs étrangers. -

Danemark. - Une industrie des aérogénérateurs s'est développée dernièrement dans ce pays qui offre sur le marché mondial des machines de qualité. La société WIND-MATIC propose des aérogénérateurs dans une gamme de 11 à 55 kW; les hélices sont avec une âme en lamellé collé, recouvert de résine renforcée de fibres de verre. Les performances, testées par le Centre d'Essais de Risø sont excellentes. Les pylônes fournis sont de type classique, auto-porteur, en cornières métalliques.

La société WIND-POWER commercialise un modèle d'éolienne multipale de 6 m de diamètre, comportant 16 pales, monté sur un pylône de 14 m. La puissance obtenue est de 10 kW pour un vent de 14 m/s.

Suisse. - La société suisse ELEKTRO fabrique et commercialise depuis 1938 des aérogénérateurs. Selon leur publicité :"des installations en place depuis plus de 30 ans, fonctionnant parfois dans des conditions difficiles, confirment le sérieux et la solidité de la construction". Cette indication sur la longévité des machines éoliennes est intéressante pour un calcul d'amortissement.



Etats-Unis. - De nombreux constructeurs offrent sur le marché américain des aérogénérateurs de qualité. La plus connue des petites machines est la WINCO, de 200 watts, comportant une hélice bipale de 1,8 m à régulation par frein aérodynamique extrêmement simple.

Malgré l'existence d'un Centre National d'Essais aux U.S.A., les fabricants fournissent rarement des courbes de puissance homologuées par ce Centre. Des aérogénérateurs relativement classiques (KEDCO,AERO POWER, NORTH WIND POWER,etc) vont sans doute être remplacés par des machines bénéficiant des recherches de ces dernières années.

Des machines à axe vertical, de type Darrieus, sont fabriquées principalement par la société DAF, au Canada.

III. - L'ECLAIRAGE DES PHARES ET BALISES.

Une mise au point sur l'expérience du Service Technique des Phares et Balises dans le domaine de l'utilisation des aérogénérateurs a été faite par Y. DURAND-RAUCHER et J. RODRIGUEZ (1982). Ce Service s'est lancé, il y a plus de trente ans, dans l'utilisation de l'énergie éolienne pour électrifier les feux et les phares isolés. Ces établissements , dont la source d'énergie était le gaz ou le pétrole présentaient, malgré leur grande fiabilité, deux inconvénients principaux :

-puissance et brillance limitées de la source lumineuse, nécessitant des optiques de grande dimension donc onéreuses;

-autonomie relativement faible conduisant à des réapprovisionnements réguliers.

L'utilisation de lampes électriques permettait de résoudre le premier problème mais l'alimentation en électricité de sites isolés n'était pas envisageable d'où l'utilisaion d'aérogénérateurs.Trente ans plus tard, on peut dire que la politique d'équipement des phares et balises avec des aérogénérateurs est satisfaisante et qu'elle portera encore longtemps ses fruits, l'électricité photovoltaïque n'étant compétitive que dans le domaine des petites puissances.

Aujourd'hui, plus de 140 aérogénérateurs équipent, de manière opérationnelle, des établissements de signalisation maritime. Les diamètres des machines utilisées vont de 1,20m à 5m, et la plupart sont du type AEROWATT à pas variable. Cinq appareils comportant une hélice de 4,70m de diamètre, à pales vrillées et calage fixe, fonctionnent également mais ont l'inconvénient de ne commencer à produire du courant qu'à partir de vents d'au moins 10 m/s. Par contre, ce sont des machines particulièrement simples et robustes.

Si l'on excepte les incidents dûs à la foudre, on constate que la majeure partie des défauts observés provient des vibrations engendrées par les machines en rotation. Ces défauts peuvent se traduire par des ruptures de pales, de liaison hélice-générateur et de pivots, ou par l'apparition de jeu dans les roulements de pivot ou d'alternateur.

Le Service des Phares et Balises a apporté une contribution à l'amélioration des aérogénérateurs par l'étude de pales en complexe verre-résine. S'il est en effet apparu que les premières pales en bois présentaient certains défauts : usure rapide et absorption d'eau différentielle entraînant un déséquilibre de l'hélice, leur remplacement par des pales en alliage d'aluminium filé n'a pas eu que des effets favorables. En particulier, l'augmentation considérable de la masse de l'hélice a eu pour conséquence d'augmenter fortement les sollicitations sur les autres éléments, cet effet négatif étant d'autant plus important que le site est perturbé. Deux machines, équipées de pales en matériau composite verre-résine époxy, fonctionnent actuellement sur des sites de la côte méditerranéenne.

Le prix moyen du kWh installé ressort, en 1979, à environ 21 francs/kWh, ce qui reste tout à fait acceptable compte tenu des sujétions de la signalisation maritime.

IV. LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.

Des îles, des sites isolés, peuvent être alimentés en eau potable par dessalement de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre. C'est le cas, par exemple, de nombreuses îles de la Polynésie. L'énergie éolienne y est économiquement rentable à partir d'un certain niveau de besoins énergétiques qui se situent, pour la Polynésie, autour de 7 à 8 kWh/jour, ce qui correspond à une éolienne de 5m environ de diamètre.

Il existe plusieurs méthodes de dessalement de l'eau mais, dans la gamme de débits souhaités, 5m³/jour environ, la méthode la plus économe en énergie et la mieux adaptée à l'énergie éolienne est le dessalement par osmose inverse.

Le principe de l'osmose inverse est basé sur le phénomène osmotique classique à savoir la perméabilité sélective d'une membrane placée entre deux compartiments contenant des solutions salées ayant des concentrations différentes. Si l'on maintient au-dessus de l'eau salée une pression supérieure à la pression osmotique, la diffusion de l'eau à travers la membrane sélective a lieu de la solution la plus concentrée vers la solution la plus diluée, ce qui a pour effet d'extraire de l'eau pure de la solution salée.La pression osmotique est proportionnelle à la teneur en sels dissous, soit de l'ordre de 0,7 bar pour une salinité de 1 gramme par litre.

La méthode de dessalement par osmose inverse consomme, en général, 10 à 12 kWh par m³ d'eau produite à partir d'une eau à 35 g/l. Pour améliorer ce rendement énergétique, une unité de dessalement équipée d'une turbine de récupération d'énergie au niveau de la saumure a été mise au point à Cadarache par le Commissariat à l'Energie Atomique (Groupe Energies Renouvelables). Cette turbine récupère environ 30% de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la pompe haute pression et la consommation, rapportée à la production d'eau douce, tombe entre 7 et 8 kWh/m³.

Une unité de ce type a été développée pour s'adapter aussi parfaitement que possible à un aérogénérateur AEROWATT de 9,2 m de diamètre.

V. - LA VENTE D'ELECTRICITE A E.D.F.

Les problèmes de couplage au réseau EDF sont examinés dans le chapitre suivant et nous donnons ici un exemple d'éolienne de petite dimension couplée au réseau.

Depuis le début de l'année 1982, E.D.F. rachète le courant basse tension aux particuliers. La commune de Perceneige, dans l'Yonne, a utilisé cette nouvelle règlementation pour demander le couplage d'un aérogénérateur dont elle est le maître d'oeuvre. L'éolienne installée est celle réalisée par M. CARRE décrite au chapitre consacré aux éoliennes à axe horizontal.

Les caractéristiques de la machine sont les suivantes : diamètre de l'hélice : 8m; nombre de pales : 3; vent nominal : 9m/s; puissance nominale : 10 kW; vitesse nominale de rotation : 90 tr/mn; hauteur du pylône : 30 m.

Le site d'implantation n'est pas particulièrement venté ce qui est le cas des régions du bassin parisien. Par contre, la hauteur choisie pour le pylône devrait permettre cependant une production de l'ordre de 25 OOO kWh/an soit une recette d'environ 8 à 12 000 francs selon les années.

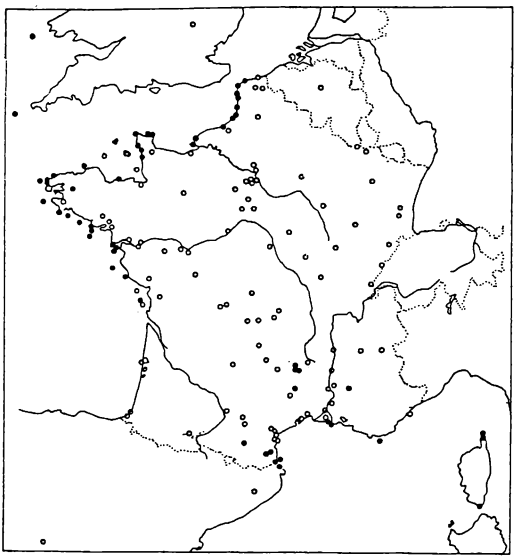
Le projet de contrat soumis par EDF à la municipalité précise que "Les fournitures ne faisant l'objet d'aucune prévision, ne sont absorbées par EDF que dans la mesure de ses besoins, sans aucun engagement de prélèvement. Les refus d'absorption peuvent être formulés sans préavis, notamment lorsque la fourniture entrave le bon fonctionnement technique de la distribution". Les tarifs d'achat proposés par EDF sont les suivants : en centimes par kWh, hors taxes, au 1er Décembre 1982 HIVER : heures de pointes :46,05; heures pleines : 33,79; heures creuses : 19,11. ETE : heures pleines : 13,22; heures creuses : 8,51.

L'hiver commence le 1er Octobre et se termine le 30 Avril. La période de pointe dure 4 heures par jour, tous les jours sauf le dimanche, de 9 heures à onze heures et de 18 à 20 heures, durant les mois de novembre à février.Les heures pleines vont en hiver de 6 à 22 heures, en dehors des heures de pointe, et en été de 7 à 23 heures.

VI. - LES REALISATIONS d'E.D.F.

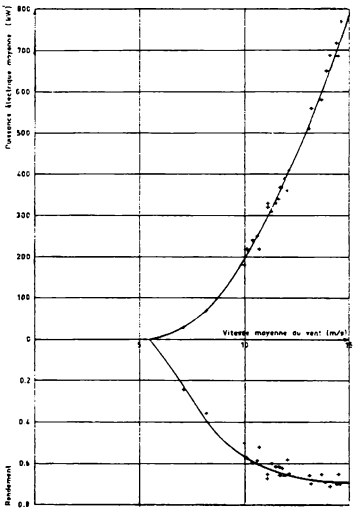
1. Les mesures de l'énergie éolienne. - Les réalisations d'EDF, dans le domaine éolien, ont été nombreuses et originales et elles furent couronnées de succès pour la plupart. Aussi a-t-on pu s'étonner à juste titre de l'échec d'Ouesssant, en 1980, ainsi que le firent maints commentateurs.

Une campagne de mesure de l'énergie éolienne, portant sur 350 sites à 40 m au-dessus du sol, fut effectuée à partir de 1946 avec l'anémomètre intégrateur Ailleret. De nombreux sites, sur les façades atlantique et méditerranéenne, ont une énergie éolienne (prenant en compte la limite de Betz) supérieure à 3000 kWh/an. Certains sites, sur les côtes nord-ouest de Bretagne disposent de 5000 kWh/an.



Energie éolienne annuelle à 40 m au-dessus du sol

● Plus de 3000 kWh/m²
○ Moins de 3000 kWh/m²



Aérogénérateur NEYRPIC

Saint-Rémy-des-Landes - Courbes de puissance et de rendement

2. L'aérogénérateur BEST-ROMANI. - Cette machine, implantée à Nogent-le-Roi, comportait une hélice tripale vrillée de 30,2 m de diamètre, en tôle d'alliage léger, à calage fixe. Les pales étaient encastrées dans le moyeu. L'hélice était reliée à un alternateur synchrone par l'intermédiaire de deux multiplicateurs à planétaires de rapport 7,5 et 3 environ. Un système d'accouplement permettait la seule transmission du couple et non des déformations que la construction du moyeu et des pales mécano-soudées ne pouvait manquer d'engendrer.

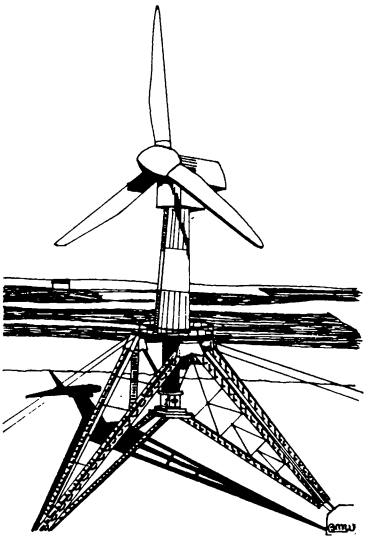
La vitesse nominale de rotation était de 47,3 tr/mn donnant une vitesse d'entraînement de l'alternateur de 1000 tr/mn. La puissance nominale de 800 kW était atteinte par un vent de 16,7 m/s. La hauteur de l'axe était de 32 m au-dessus du sol. Cet aérogénérateur a fonctionné 5 428 heures de 1958 à 1962, période durant laquelle de nombreux essais furent effectués montrant le bon comportement éolien de la machine malgré un certain nombre d'incidents d'ordre mécanique.

Les principales performances de la machine concernent :

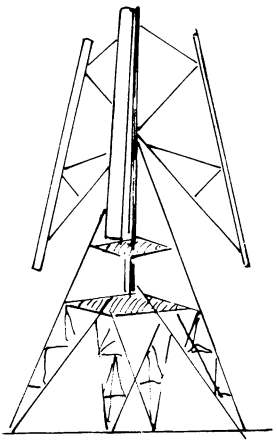
-le rendement maximal de l'hélice seule qui est de 0,85 (par rapport à la limite de Betz) et celui de l'aérogénérateur qui est de 0,70.

-la courbe de puissance a dépassé les prévisions, la machine ayant atteint un maximum de 1 025 kW.

-l'auto-orientation de l'hélice marche à partir d'un vent de 3 m/s si l'hélice tourne. A partir d'un écart de 45°, la machine s'oriente san vibration ni oscillation en quelques secondes.



Aérogénérateur BEST-ROMANI



Eolienne Darrieus - Morel - E.D.F.

-les freinages mécaniques et électriques ont donné satisfaction, malgré divers incidents. L'action combinée des deux freins, même par vent fort, arrête l'ensemble en moins de deux tours d'hélice;

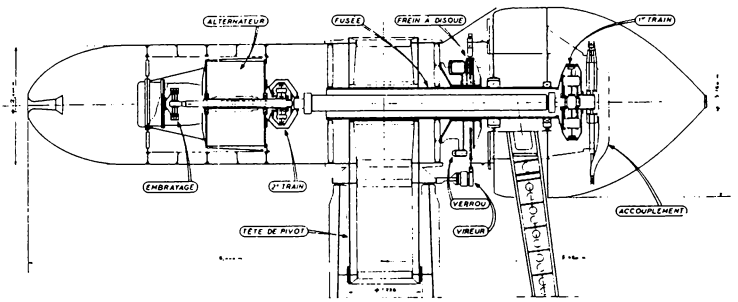
-les vibrations de pales sont très faibles. La machine s'est bien comportée au cours des rafales où la puissance peut passer, par exemple, de 300 à 900 kW en quelques secondes;

-il n'y a pas de signe de vétusté après 5428 h de fonctionnement et 38000 heures d'exposition aux intempéries, hormis la peinture des pales.

3. Les aérogénérateurs Neyrpic. - Deux machines furent expérimentées à Saint-Rémy-des-Landes. L'une de 21,2 m de diamètre, d'une puissance nominale de 132 kW pour un vent de 12,5 m/s. L'autre de 35 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1000 kW pour un vent de 17 m/s.

Ces deux modèles comportaient des hélices tripales à pas variable, placées en aval du pylône et auto-orientable. Après divers incidents, de bons résultats d'exploitation furent obtenus; le rendement moyen de la machine de 21,2 m, sur trois années, a été de 0,34, par rapport à la limite de Betz.

4. Les éoliennes à axe vertical. - Deux éoliennes à axe vertical furent expérimentées, de type Darrieus, à pales droites mais formant un cône de rotation. Une machine de 7 kW nominal, pour un vent de 10 m/s, comportait trois pales tournant selon un cône ayant les dimensions suivantes : hauteur : 5,7m; diamètre inférieur 8,5 m; diamètre supérieur : 4,2 m. Les essais ont conduit à un facteur de conversion de l'ordre de 0,23, en moyenne.



Nacelle de l'aérogénérateur BEST-ROMANI

Une deuxième machine de 5 kW nominal, par vent de 10 m/s, avaient des pales formant un cône d'angle au sommet plus important de façon à obtenir une courbe de rendement plus aplatie donc une plage de rendement maximal valable pour une gamme étendue de vitesses de vent.

5. L'aérogénérateur d'OUESSANT. -

(rapports EDF par P. LECLERE - 1979 - 1982).

Situation énergétique de l'île d'Ouessant. - L'île d'Ouessant est alimentée en électricité par des groupes électrogènes et la consommation de l'île est en augmentation depuis de nombreuses années. Cet accroissement avait justifié l'installation d'un nouveau groupe en 1979. Le coût du kWh électrique est beaucoup plus élevé que sur le continent (0,60 franc en 1978), le coût du combustible rendu à Ouessant y contribuant pour moitié.

Le choix de l'île d'Ouessant se justifiait pour expérimenter un couplage d'aérogénérateur au réseau de l'île et cela pour de nombreuses raisons :

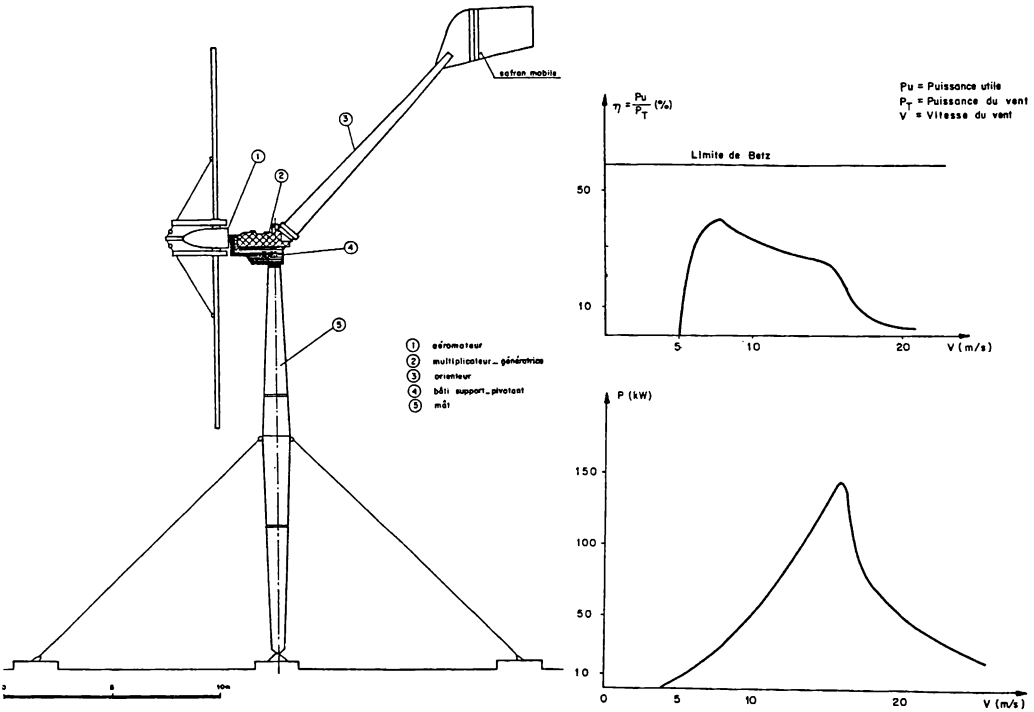
- les besoins en électricité sont à l'échelle des aérogénérateurs, la simulation de la production annuelle montrant qu'un aérogénérateur de 18 m de diamètre, de puissance nominale 100 kW, couvrait environ 20 % de la demande, en 1979;

-le couplage éolienne/diésel permet une économie de fuel des groupes électrogènes;

-les estimations économiques montrent qu'à Ouessant le coût de production de l'électricité d'origine éolienne est presque compétitif avec le coût de production des groupes électrogènes;

-l'île d'Ouessant est un site particulièrement bien venté, le vent moyen annuel étant de 8 m/s, et bien adapté à l'implantation d'aérogénérateurs par suite de son absence de relief.

Lenteurs et difficultés d'implantation. - Dès 1976, une convention a été signée entre EDF et l'Agence pour les économies d'énergie qui accorda une subvention au projet. Celui-ci connu alors de nombreuses difficultés juridiques. Bien que la plus grande partie de l'île satisfasse aux critères techniques permettant l'implantation,



Aérogénérateur de 100 kW installé à l'île d'Ouessant

Aérogénérateur AEROWATT Courbe de puissance

de nombreux ministères dressèrent des barrières juridiques pour des raisons variées : radiophare, aérodrome, tour P et T , tour TV, parc d'Armorique,etc.Finalement la mise en place de l'aérogénérateur ne put avoir lieu qu'en 1979.

Caractéristiques de l'aérogénérateur - La société AEROWATT étudia et réalisa un aérogénérateur en extrapolant, semble-t-il, leurs modèles existants : le rotor est une hélice bipale de 18 m de diamètre en alliage d'aluminium, à calage variable, le démarrage ayant lieu pour un vent de 4 m/s. De manière générale, les éléments de construction de l'aérogénérateur, autres que ceux formant le moteur éolien, ont été choisis parmi des productions industrielles de série. Une génératrice asynchrone, à cage d'écureuil classique, (LEROY-SOMER -120 kVA -380 V triphasé) est couplée au multiplicateur.

Le choix de ce type de génératrice est basé sur les avantages suivants

-machine électrique simple, robuste et moins onéreuse qu'une génératrice synchrone;

-couplage plus simple puisque la machine peut fonctionner dans un domaine de vitesse légèrement variable;

- sécurité intrinsèque en cas de court-circuit aux bornes;

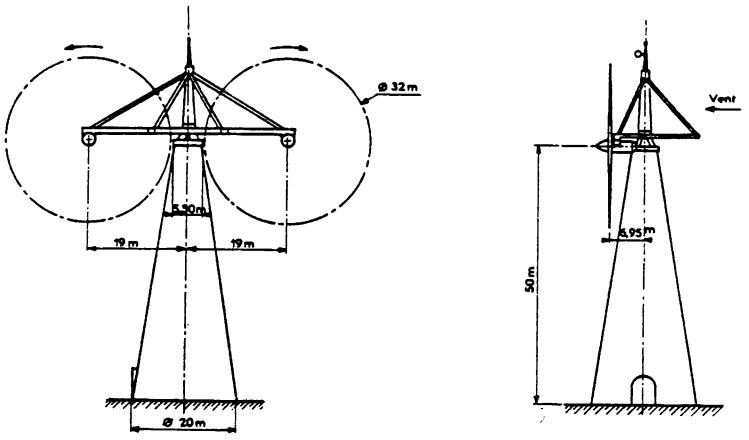
-excellent rendement si l'on a une adaptation d'impédance correcte.

Couplage au réseau. - Le couplage au réseau de l'île peut s'effectuer lorsque la vitesse de rotation de l'hélice atteint 89 tr/mn. Pour décider du couplage, on effectue une comparaison de signaux délivrés par deux alternateurs tachymétriques, l'un entraîné par la génératrice de l'éolienne, l'autre par le réseau.

Lors de l'accélération du rotor de l'éolienne, au moment du passage au synchronisme, le couplage s'effectue par l'intermédiaire d'un contacteur statique à thyristors (déclenchement par train d'impulsions).

Destruction de la machine. - A la suite d'une rupture de pale, l'aérogénérateur a été entièrement détruit en Juillet 1980. Un second aérogénérateur du même type, installé dans les Landes, a été endommagé de la même façon. La rupture de pale s'est produite dans une zone mécaniquement très chargée du pied de pale. Les analyses ont montré que la qualité des matériaux et des usinages n'étaient pas en cause. Des calculs, repris ultérieurement, ont montré qu'il est très difficile de réaliser une attache de pied de pale qui satisfasse en tout point aux contraintes imposées, compte tenu de la sensibilité à la fatigue de l'alliage d'aluminium utilisé. Il aurait donc semblé nécessaire de s'orienter, dès le début de la conception, vers des matériaux composites permettant la réalisation de pales plus légères.

De plus, l'orientation par dérive, pour une machine de cette importance, paraît atteindre ses limites car la poutre du gouvernail et la dérive se comportent comme un balancier susceptibles d'entretenir ou d'amplifier les vibrations de la structure. Pour les rotors de taille moyenne, un fonctionnement sous le vent, en auto-orientation, semblerait une solution plus satisfaisante. Ce fut le cas, par exemple, de la machine de Saint-Rémy-des-Landes, d'un diamètre de 21,2 m, dont l'expérimentation par EDF, de 1962 à 1966 donna toute satisfaction. Il en fut de même pour l'aérogénérateur BEST-ROMANI de 30,2 m de diamètre.



Projet d'aérogénérateur de 2 MW à deux rotors - L. ROMANI -

VII. - LES AEROGENERATEURS DE MOYENNE ET GRANDE PUISSANCE.

1. Couplage à un réseau de distribution. - Diverses études ont montré que l'électricité d'origine éolienne, distribuée par un réseau était, de loin, celle dont le prix de revient était moindre que les autres utilisations énergétiques des aérogénérateurs. Ceci a conduit nombre de pays à investir dans des programmes importants de développement de grands aérogénérateurs en vue de leur couplage à un réseau de distribution.

Le coût minimal du kWh éolien serait produit, semble-t-il, par des machines situées dans une gamme de puissances de 1 à 3 mégawatts. Cependant de sérieux doutes subsistent encore sur les "bonnes" dimensions des machines de moyenne et grande puissance. D'autre part, est-il préférable de fabriquer des éoliennes dont le diamètre dépasserait 100 m, par exemple, ou au contraire des millions de petites machines produites à des coûts de grande série ? Il semble que, par suite de la diversité des applications et des situations, des machines de toutes dimensions seront nécessaires

La plupart des pays européens ont depuis quelques années des programmes ambitieux dans le domaine éolien et certains pays ont déjà des réalisations importantes. Le budget éolien français, en 1983, est de 13 MF; pour la seule année 1980, le budget éolien de la R.F.A. s'est élevé à l'équivalent de 150 MF, alors que son potentiel éolien est bien inférieur à celui de la France.

Est-il réaliste, en France, de vouloir développer une industrie française des éoliennes, à volonté exportatrice, sans l'existence d'un marché intérieur porteur?

2. Les réalisations européennes. -

Danemark. - L'industrie éolienne s'est développée rapidement et en l'espace de 7 ans, environ 800 aérogénérateurs de 10 à 55 kW ont été installés au Danemark. L'aérogénérateur de TVIND, de 800 kW, a été décrit au chapitre chauffage éolien. Deux grands aérogénérateurs de 630 kW chacun, de 40 m de diamètre, ont été implantés à NIBE, l'un en 1979, l'autre en 1980. La société VOLUND a mis en service, en 1982, un aérogénérateur de 265 kW raccordé au réseau. Un programme portant sur 2000 aérogénérateurs de moyenne puissance est envisagé pour participer à la production électrique du pays.

R.F.A. - Le gouvernement allemand a apporté un soutien financier à plus de 40 projets portant à la fois sur de petites machines et des aérogérateurs de grande puissance. Deux machines, l'une de 48 m (350 kW), l'autre de 52 m (265 kW), ont été implantées en 1982. La construction de GROWIAN-1, dont le projet avait débuté en 1976, s'achève. C'est un aérogénérateur de 100 m de diamètre, d'une puissance de 3 MW, implanté à l'embouchure de l'Elbe; le pylône à une hauteur de 96,60m. La production d'énergie annuelle sera de l'ordre de 10 à 12 millions de kWh. Un programme de plusieurs milliers de grandes éoliennes est envisagé.

Autres pays européens. - La Suède a implanté en 1982, un aérogénérateur de 2 MW, 75 m de diamètre, dans l'île de Gotland, en mer Baltique. Une machine de 3 MW, d'un diamètre de 78 m, vient également d'être terminée et est implantée à Maglarp, près de la côte baltique. Pour cette dernière machine, le pylône est en acier, de 80 m de haut et 3,80m de diamètre. L'hélice comporte deux pales en résine époxy renforcée de fibres de verre.; la vitesse de rotation est de 25 tr/mn. Cette machine produira environ 8 millions de kWh par an. Une seconde machine du même type, de 4 MW, est en cours d'étude.

Au Pays-Bas, une éolienne de 25 m de diamètre, d'une puissance de 400 kW fonctionne depuis deux ans à Petten où sont testées également des machines de petites tailles.

La Grande-Bretagne a une machine de 25m, de 200 kW, au Pays de Galles. Une machine de 3 MW sera installée dans les Orcades en 1984. L'Italie teste une machine de 68 kW, d'un diamètre de 13 m (Société FIAT). Une entreprise belge, employant 120 ouvriers, fabrique des aérogénérateurs de 10 à 150 kW et exporte la plus grande partie de sa production.

Etats-Unis. - L'ampleur du programme américain éolien est impressionnant. Son budget a été le suivant, en millions de dollars :

	1979	1980	1981
Analyse et recherches	6,4	8,3	7,7
Etudes du potentiel éolien	4,5	4,9	6,2
Développement technologique	9,0	10,6	15,5
Développement de machines éoliennes	33,8	19,5	48,5
Etudes de marketing	4,5	2,0	7,0
Equipement et construction	1,4	18,1	2,1
Total	59,6	63,4	87,0

Les prototypes et les aérogérateurs sont rapidement sortis des bureaux d'études avec de tels budgets financés en partie par les compagnies américaines de production et de distribution d'électricité. Le programme gouvernemental, réalisé par la NASA, a porté sur les grandes machines suivantes :

1975 : Mod 0 : 38 m de diamètre, 100 kW.

1977/1982 : Mod 0A : 200 kW, 38m; 4 machines.

1978 : Mod 1 : 2 MW, 60 m.

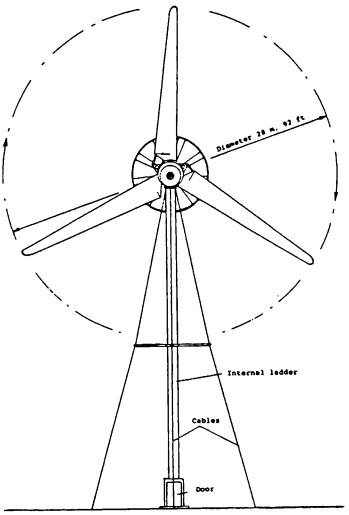
1979 : Mod 2 : 2,5 MW, 90 m ; 3 machines.

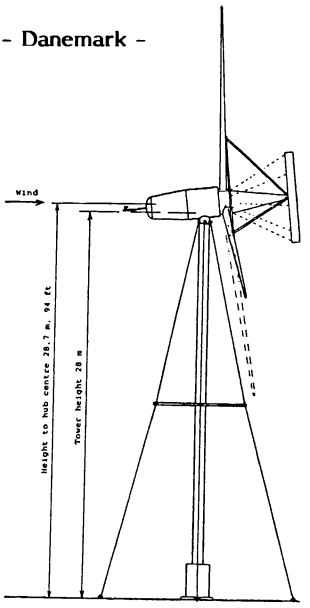
La société ALCOA commercialise trois types de machines : 57 kW,20m; 311 kW,45m; 511 kW,45m. Les Laboratoires SANDIA ont fabriqué 9 machines de 100 kW,17m. La SOUTHERN California étudie des machines de 3 et 7 MW.

Canada. - Les éoliennes à axe vertical sont une spécialité canadienne en ce qui concerne les grandes puissances. L'éolienne de 37 m des îles de la Madeleine est décrite au chapitre consacré aux éoliennes à axe vertical. Le projet Eole, qui sera la prolongation de cette réalisation prévoit une machine à axe vertiacl de 110m de haut et d'une puissance de 4 MW. La société DAF commercialise des éoliennes à axe vertical de 50 kW et un modèle de 500 kW.

VIII. - QUELQUES EXEMPLES DE GRANDS AEROGENERATEURS

1. Aérogénérateur VOLUND de 265 kW - Danemark -





Eolienne tripale de 28 m de diamètre

Largeur des pales près du moyeu : 1,8 m - à l'extrémité : 0,60 m -

Profils : NACA 4412 et NACA 4420 - Pales à deux profils -

Calage variable commandé par un régulateur centrifuge -

Puissance nominale par vent de 13 m/s : 265 kW

Inclinaison de l'axe de rotation par rapport au plan horizontal : 6° - Angle de "coning"4°

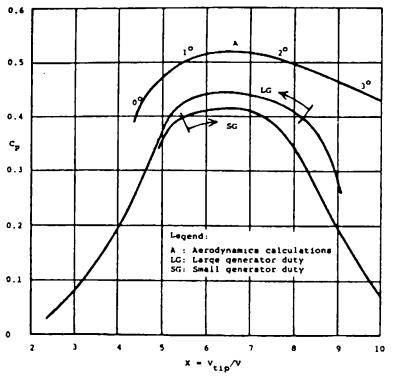
Tour tronconique de 28 m de hauteur - Diamètres : à la base : 1,40m -
au sommet : 0,80 m

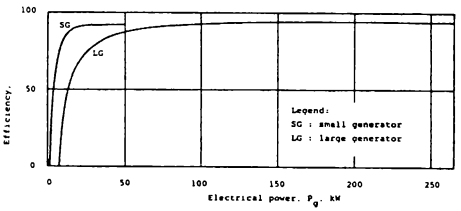
Rotor auxiliaire placé en aval du rotor principal permettant une auto-orientation

Vitesse de rotation : 42 tr/mn par vent fort - 28 tr/mn par vent faible -

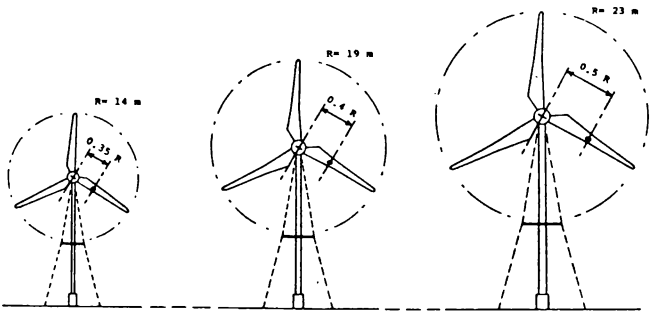
Génératrices : LG : 265 kW- vitesse de rotation : 1512 tr/mn
SG : 58 kW - vitesse de rotation : 1008 tr/mn

Poids total : 20 tonnes - Rotor avec les pales : 4 tonnes





Facteur de conversion -Eolienne VOLUND **Rendement des génératrices**-SG:6 pôles LG:4pôles



Programme de développement d'aérogénérateurs de la firme VOLUND

2. Aérogénérateurs de NIBE de 630 kW - Danemark -

Deux aérogénérateurs de 40 m de diamètre de 630 kW de puissance nominale par vent de 13 m/s. Deux systèmes de régulation par calage variable des pales sont testés : aérogénérateur A : régulation par décrochage aérodynamique.

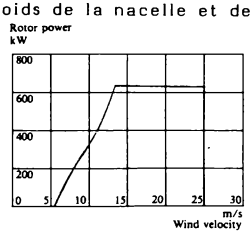
aérogénérateur B : régulation par mise en drapeau

Eoliennes tripales -Profils : NACA 4412 et NACA 4434 - Pales vrillées : 11° de torsion - Pales en acier et matériau composite (fibres de verre et polyester).

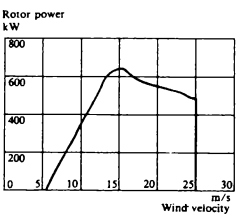
Inclinaison de l'axe de rotation du rotor par rapport au plan horizontal : 6°

Vitesse de rotation : 34 tr/mn - Paramètre maximal de fonctionnement : 5,4.

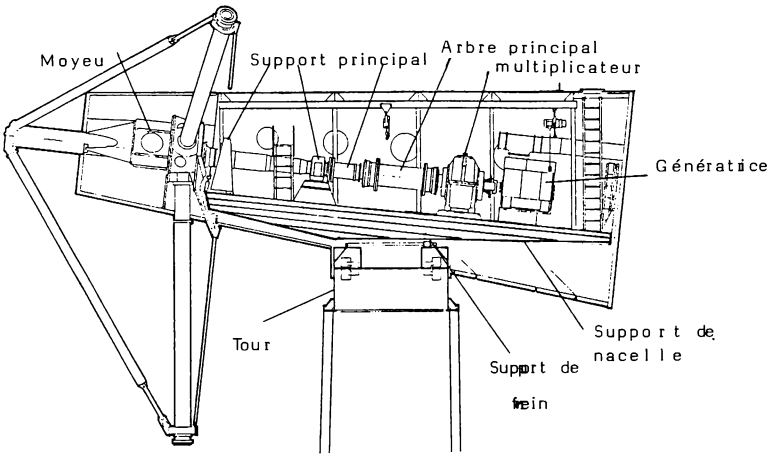
Poids de la nacelle et des pales : 80 tonnes.



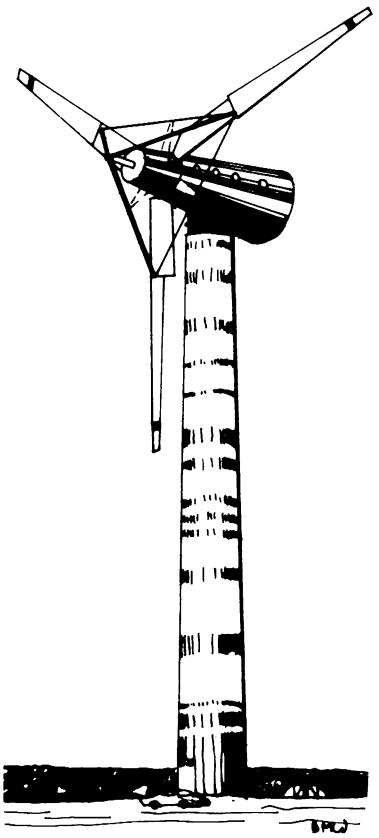
Eolienne B



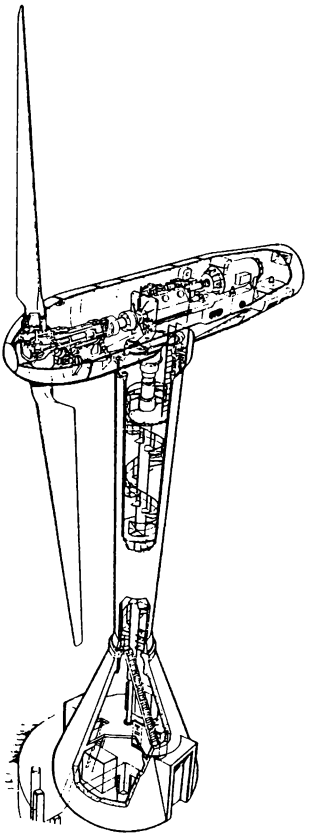
Eolienne A



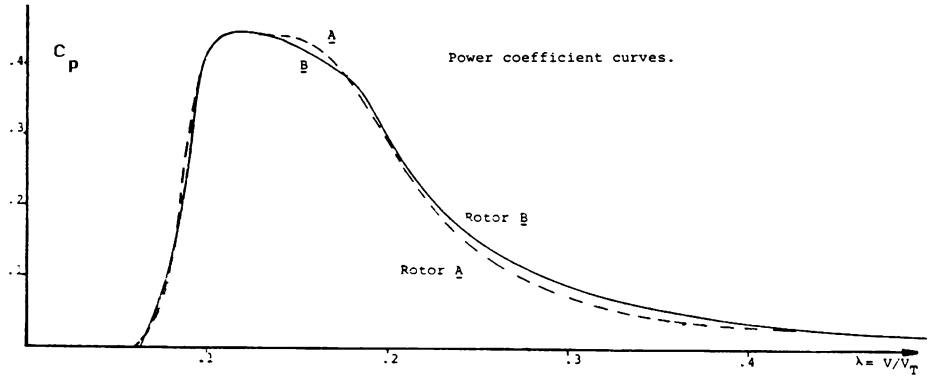
Nacelle - Eolienne danoise de NIBE -



Aérogénérateur de NIBE - Eolienne A -
Diamètre : 40 m -Puissance : 630 kW



Aérogénérateur de PETTEN-Hollande-
Diamètre : 25 m -Puissance : 302 kW-



Facteur de conversion des aérogénérateurs de NIBE

3. Aérogénérateur GROWIAN I de 3 MW - République Fédérale Allemande-

La République Fédérale Allemande a réalisé le plus grand aérogénérateur d'une puissance de 3 MW par vent de 11,8m. Le diamètre du rotor bipale est de 100,4 m et est placé en aval d'une tour cylindrique haubannée en acier.

L'aérogénérateur est implanté à l'embouchure de l'Elbe, au lieu dit Kaiser Wilhelm Koog. Un second projet, de 145 m de diamètre, est prévu.

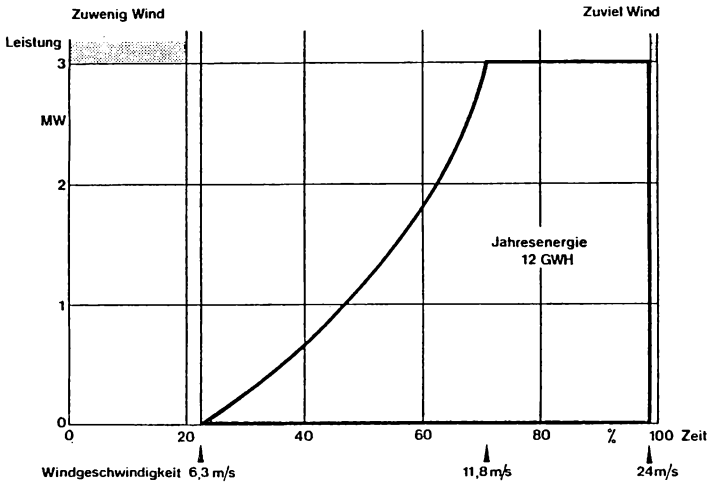
Les pales sont en matériau composite, de profil FX-77-W - La largeur des pales va de 4,25m en pied de pale à 1,30m à l'extrémité.

La vitesse de rotation nominale est de 18,5 tr/mn -

Le paramètre de fonctionnement optimal est égal à 8.

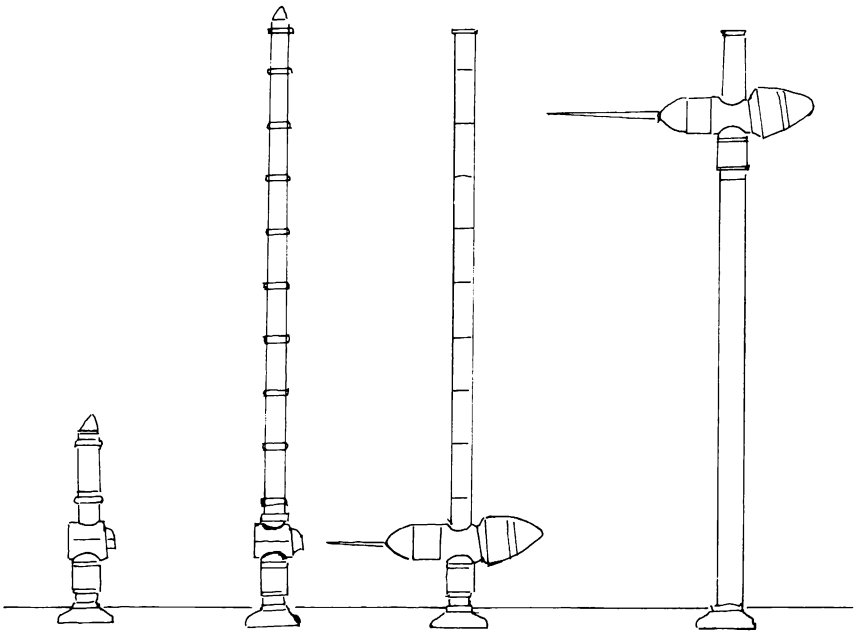
La génértarice tourne à 1500 tr/mn; le rapport de multiplication est de 81.

Le poids de la nacelle et du rotor est de 310 tonnes.



Courbe de puissance en fonction du temps (en pourcentage)

GROWIAN - I - R.F.A. -



GROWIAN I – République Fédérale Allemande –

Montage de la tour et de la nacelle.

Tour :

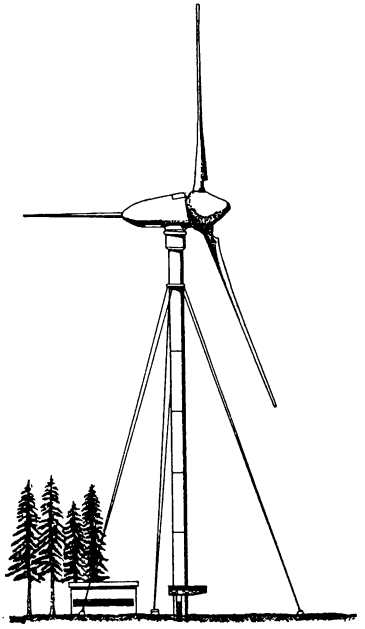
Hauteur : 96,6 m

Diamètre : 3,5 m

10 cylindres de 9 m

1 cylindre de 6,6 m

Ascenseur extérieur

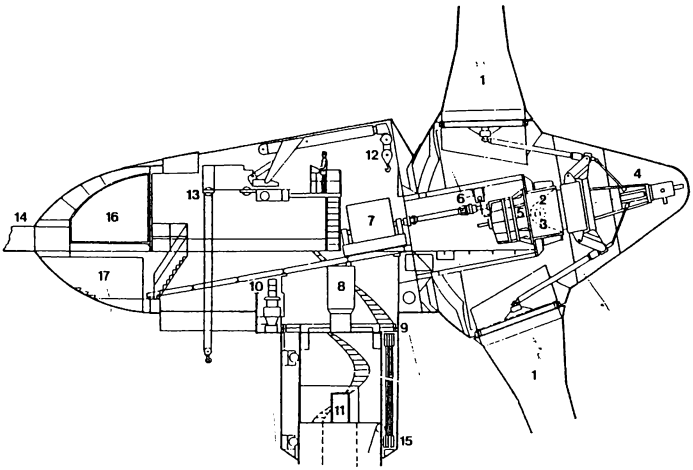


Diamètre des pales

100,4 m

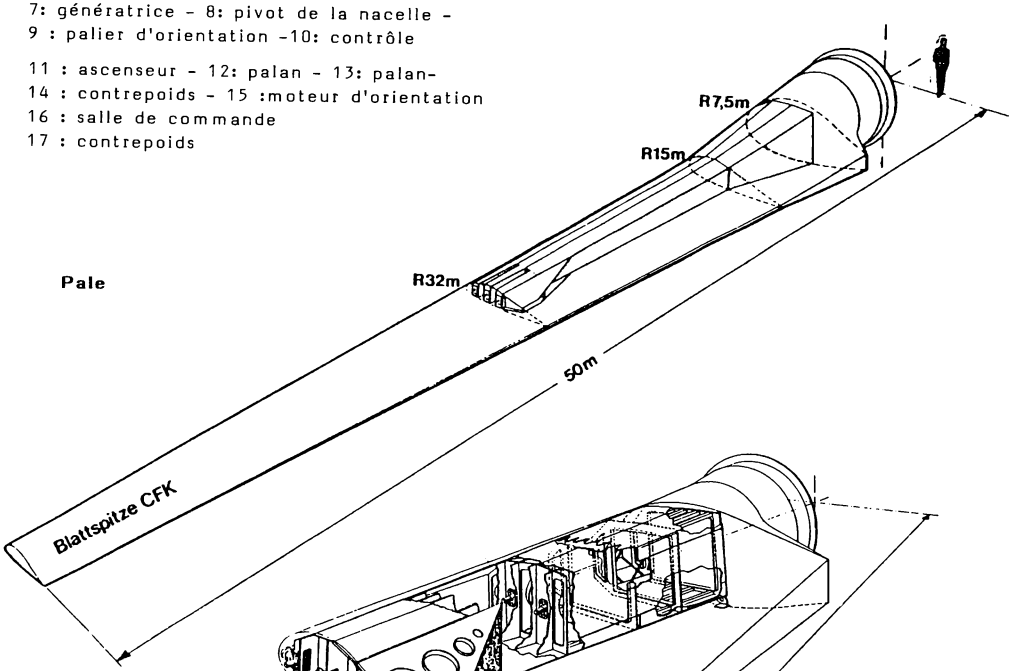
Production annuelle

12 GWh

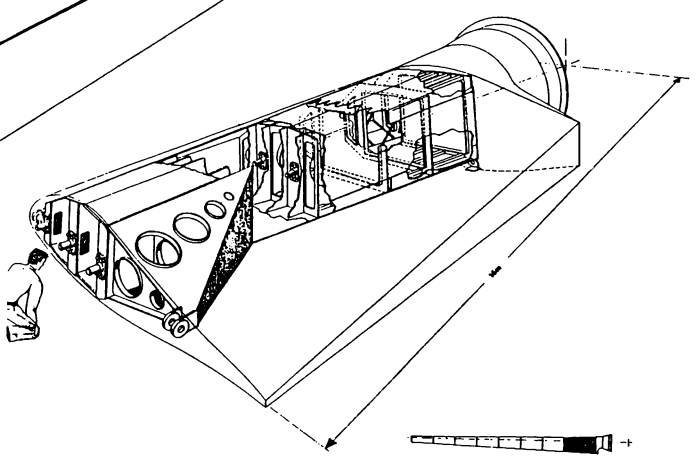


GROWIAN I – Nacelle vue en coupe –

1:pale – 2: palier du rotor – 3: système d'articulation
4: commande du calage – 5: multiplicateur – 6: frein –
7: génératrice – 8: pivot de la nacelle –
9 : palier d'orientation –10: contrôle
11 : ascenseur – 12: palan – 13: palan–
14 : contrepoids – 15 :moteur d'orientation
16 : salle de commande
17 : contrepoids



Pale



Détail d'une pale

CHAPITRE XII

Possibilités de couplage de petits ou grands aérogénérateurs sur le réseau

par **Patrick LECLERE**
Ingénieur-Chercheur
Etudes et Recherches Electricité de France - CHATOU -

I. - INTRODUCTION

Les possibilités de couplage de petits ou grands aérogénérateurs sont différentes tant par les problèmes posés que par les enjeux qui sont engagés.
On entend par petits aérogénérateurs les machines qui typiquement peuvent être la propriété d'un ou plusieurs particuliers, c'est-à-dire des machines d'une puissance de 1 kW à quelques dizaines de kilowatts (souvent moins de 15 kW).

Les grands aérogénérateurs sont des machines éoliennes dont les diamètres peuvent aller de 20 à 100 m, c'est-à-dire des puissances de quelques centaines de kilowatts à plusieurs mégawatts.

II. - PETITES MACHINES DOMESTIQUES

1. Remarques préliminaires. - Dès 1979, des demandes de renseignements nombreuses sur des aérogénérateurs domestiques parvenaient à E.D.F. S'il est relativement facile de donner des éléments techniques ou économiques d'ordre général, par contre, aujourd'hui encore, on ne peut s'en remettre qu'aux données très incertaines des constructeurs en ce qui concerne le rendement et la fiabilité des machines. La création du centre d'essais éoliens de Lannion devrait effacer ces difficultés.

On constate d'ailleurs que les pays qui se sont dotés de tels moyens : Etats-Unis (Rocky Flats) et Danemark (Risö), ont réussi à extraire, à partir d'un éventail très large mais très disparate d'aérogénérateurs, des produits de bonne tenue, à les améliorer et à en réduire le prix.Ces éoliennes, après s'être placées confortablement sur le marché intérieur, commencent maintenant à s'exporter.Mais pour conquérir un marché, c'est autant le critère de coût que l'image de marque qui déterminent le choix; n'oublions pas que pour le particulier la préoccupation majeure est de trouver sur le marché bancaire les fonds pour l'achat de l'équipement.

Cette introduction permet de mieux concevoir qu'il soit malaisé de parler de rentabilité ou de bilan économique; en effet, d'une part le marché actuel est souvent un marché militant et d'autre part, les critères de rentabilité qui se définissent à l'intérieur d'un ménage ont parfois de quoi faire tressaillir des financiers ou des économistes.Les chiffres des tableaux 1 et 2 n'ont donc valeur que d'indicateurs.

Ce que l'on peut cependant conclure, c'est que l'énergie électrique éolienne est encore chère et peut se comparer au prix de celle produite par de petits groupes électrogènes.

2. Les possibilités de raccordement au réseau. - Parmi les possibilités d'utilisation d'aérogénérateurs, il y a celle qui consiste à débiter sur un réseau.

E.D.F. offre depuis le début de 1982, la possibilité de racheter en basse tension à des micro-producteurs tout ou partie de l'énergie produite; ceci afin de permettre de valoriser les sources de très faible puissance comme les éoliennes, les micro-centrales hydrauliques, les groupes à énergie totale,etc.

Les règles de base de ces raccordements sont :

-ne pas détériorer la qualité du service due à la clientèle;

-ne pas porter atteinte à la sécurité tant du matériel que des agents travaillant sur les ouvrages;

Avant de conclure à la possibilité d'un raccordement en basse tension, il faut s'assurer que :

-le fonctionnement de la source n'entraîne pas des variations excessives de la tension du réseau;

-les à-coups de tension au démarrage restent admissibles;

-les ouvrages ont une capacité suffisante (changement de transformateur, augmentation de section,etc).

Ces contraintes imposent en particulier l'utilisation de machines asynchrones, des puissances inférieures à 100 kVA, et aussi que la puissance totale installée dans une même zone soit limitée.

Sur le plan des protections, le producteur sera protégé des défauts sur ses installations par le classique disjoncteur. Lorsque les défauts sont situés en dehors des installations du producteur, les organes de sécurité du réseau provoquent le découplage des sources de production. Enfin, un dispositif cadenassable doit permettre une coupure visible des sources.

Les tarifs de rachat applicables en Juillet 1981 étaient les suivants :

Heure de pointe : 40,17 c/kWh

Heures pleines d'hiver : 29,40 c/kWh

Heures creuses d'hiver : 16,93 c/kWh

Heures pleines d'été : 12,96 c/kWh

Heures creuses d'été : 8,64 c/kWh.

Machine	P_N (W)	V_N (m/s)	ϕ rotor (m)	Production annuelle (kWh/an)	Prix départ usine (F)	Prix rendu monté* (F)	Coût du kilowatt-heure actualisé F/kWh avec convertisseur	Coût du kilowatt-heure actualisé F/kWh sans convertisseur
1	1100	5	9,20	4 730	96 170	126 170	3,13	2,91
2	1100	7	5,00	3 065	45 570	75 570	2,90	2,55
3	1200	10	3,20	1 540	28 880	58 880	4,49	3,80
4	1000	9	2,40	1 920	16 600	46 600	2,85	2,30
5	1100	11	4,20	2 855	17 500	47 500	1,95	1,58
6	1200	9	4,00	2 380	17 900	47 900	2,36	1,92
7	1200	11	3,70	1 950	13 450	43 450	2,62	2,08
8	1200	11	4,90	2 525	15 900	45 900	2,14	1,72

TABLEAU N°1

Prix 1982

Machine	P nom. (W)	ϕ rotor (m)	Puissance pour un vent V (m/s) (1)								E annuel kWh	$\bar{P}$	HEPP (2)	$\eta_{\bar{E}}$ (3)
			1	3	5	7	9	11	13	> 15				
1	1100	9,20	0	390	1100	1100	1100	1100	1100	1100	4730	540	4300	0,10
2	1100	5,00	0	90	490	1100	1100	1100	1100	1100	3065	350	2790	0,22
3	1200	3,20	0	0	160	420	650	1200	1200	1200	1540	175	1280	0,27
4	1000	2,40	0	0	270	575	1000	1000	1000	1000	1920	220	1920	0,60
5	1100	4,20	0	60	520	925	1050	1100	1100	1100	2856	330	2595	0,29
9	1200	3,00	0	100	200	500	1100	1200	1300	1300	2685	310	2240	0,53
6	1200	4,00	0	0	240	890	1200	1270	1230	1200	2380	270	1985	0,27
7	1200	3,70	0	0	200	550	1150	1200	1200	1200	1950	220	1630	0,26
8	1200	4,90	0	0	360	890	1150	1200	1200	1200	2525	290	2105	0,19

TABLEAU N° 2

(1) On suppose que toutes les machines ont leur axe à 10 m du sol

(2) HEPP : heures équivalentes à pleine puissance = E/P_N

(3) η_E = rendement énergétique moyen sur l'année = $E/(S.E_B)$; S: surface rotorique; E_B = énergie théoriquement récupérable à 10m du sol = 711 kWh/m².an

On peut remarquer que comme sur notre territoire il y a plus d'énergie éolienne en hiver, ces tarifs sont valorisants pour les aérogénérateurs (tableau 3); ce serait le contraire si l'on utilisait des photopiles.Une étude de cas effectuée sur une installation type comportant un aérogénérateur du commerce performant et peu cher, montre que le temps de retour de l'investissement varie de 6 à 10 ans. Si l'on s'en tient au critère de choix lié à la méthode de l'actualisation, plutôt adaptée aux projets de grandes dimensions, on montre que le bilan est à peine favorable.

Encore une fois répètons-le, il faut être très prudent quant aux conclusions car pour un particulier le simple critère d'autosuffisance peut constituer un critère de rentabilité absolue.Retenons cependant que très objectivement, ce type de raccordement est encore loin de constituer une rente car les machines et le raccordement restent trop onéreux.

III. - LES GRANDS AEROGENERATEURS

L'introduction massive de systèmes de production électrique utilisant l'énergie éolienne n'est pas aussi simple et immédiate qu'il paraît; les problèmes techniques et économiques à résoudre sont nombreux.

LES PROBLEMES TECHNIQUES

1. L'effort industriel. -S'il est relativement aisé d'implanter une ou quelques machines, par contre un programme de grande ampleur présente des difficultés et des efforts qu'il ne faudrait pas sous-estimer.

Prenons un exemple, pour fixer les idées et donnons-nous comme objectif 5% de la consommation électrique de 1980, soit 12 440. 10^6 KWh, on admet que des machines de 2 000 kW (60 m de diamètre) sont industriellement disponibles et produisent 6.10^6 kWh par an.Avec une production de 5 machines par semaine, il faudrait huit années pour construire les 2 080 aérogénérateurs nécessaires. En outre, ce type d'aérogénérateur demande douze mois pour les usinages et le pré-assemblage et six mois ou plus pour le montage et le démarrage.Actuellement, les grands aérogénérateurs n'existent que sous la forme de prototypes. Les Américains pensent que les aérogénérateurs industriels de forte puissance devraient voir le jour d'ici quatre ans pour peu que l'on poursuive l'effort actuel (28,6 M$ en 1980).

On voit donc que de tels objectifs ne se satisferont pas d'un artisanat mécanisé, mais nécessiteront bel et bien un véritable déploiement scientifique et industriel.

2. Les problèmes de site. - La France est relativement favorisée sur le plan éolien, mais malheureusement n'importe quel site quelque peu venté ne convient

pas nécessairement. Aussi les sites utilisables en France se limitent à certaines zones favorables (côte Atlantique essentiellement).D'autre part, certains paramètres, le relief en particulier, peuvent à quelques centaines de mètres près, séparer un site excellent d'un site médiocre.

Notons que si l'on dispose d'un site très venté et très étendu, il est faux de penser que l'on puisse resserer autant que l'on veut les éoliennes.Deux effets s'y opposent :

-l'effet de sillage;

-l'effet du ralentissement des filets d'air dû à un fonctionnement des éoliennes des rangées précédentes.

A-t-on intérêt à espacer le plus possible les aérogénérateurs ? Dans la pratique pas nécessairement, car on se pénalise financièrement en investissements pour les voies d'accès et les connections.En fait, il faut trouver un optimum adapté à chaque parc de machines.

3. La stabilité du système de production-distribution. - Un problème à prendre en compte, est celui de l'interaction aérogénérateurs/moyens de production classiques. Il est bien évident que la planification de la production d'une éolienne est impossible, mais tant que le rapport puissance éolienne installée/puissance du parc de production conventionnel reste faible, les variations lentes induites par l'énergie éolienne peuvent être, de façon globale, absorbées par les moyens classiques.

Il reste que les variations de puissance très rapides des éoliennes (20 à 100% de la puissance nominale en 10 où 20 secondes) posent le problème de la rapidité de prise en charge des installations thermiques ou autres mises en parallèle.

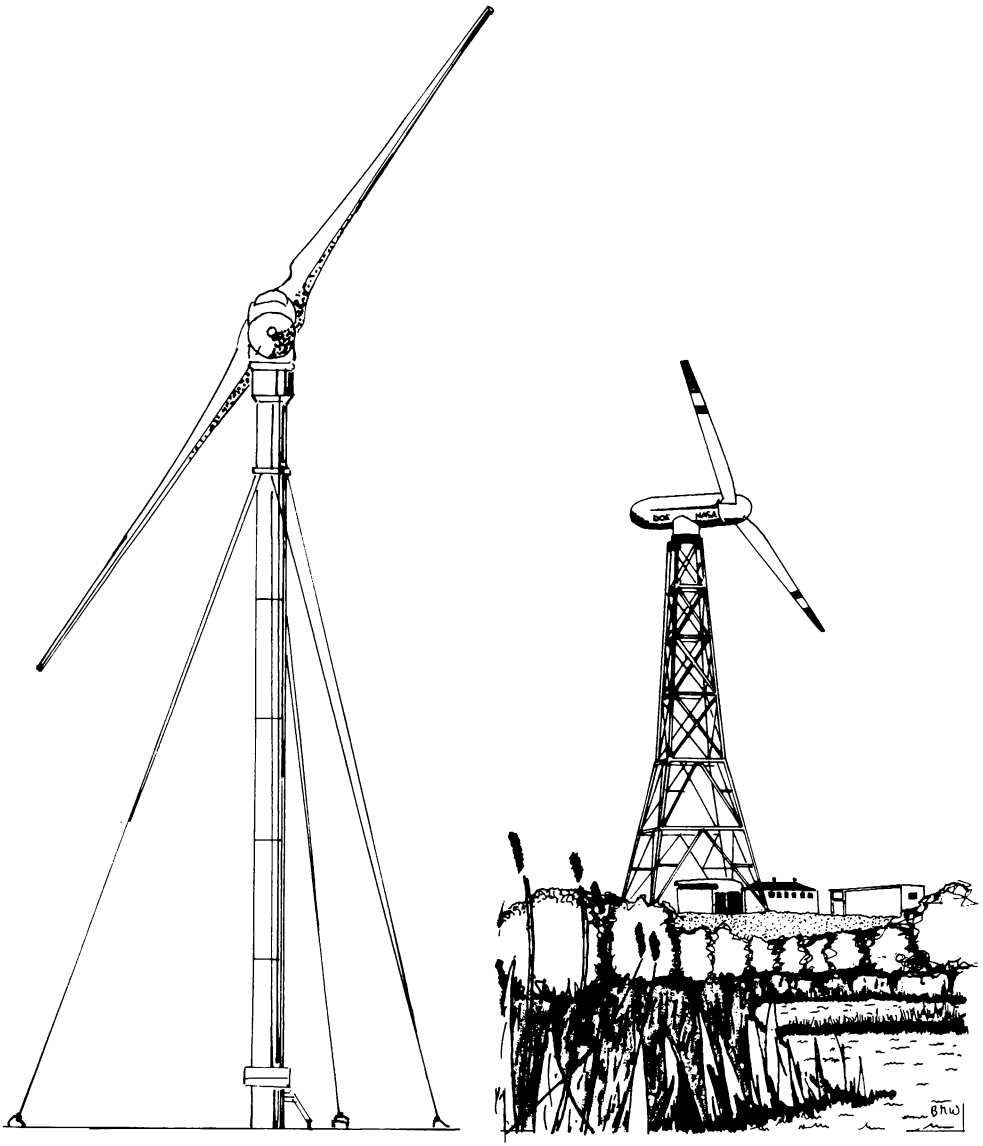
Il n'existe malheureusement pas à l'heure actuelle de solution satisfaisante pour remédier à ces problèmes.

A partir des études disponibles, il ressort qu'en installant moins de 10% de la puissance maximale appelée par le réseau, on se prémunit des difficultés précédemment citées.

Dans le cas où une éolienne est isolée, des solutions utilisant un stockage d'énergie sont bien maîtrisées.

LES NUISANCES

4. L'impact écologique. - A l'heure actuelle, pour quelques machines, il apparaît inexistant.Dans le cas de grands parcs, il est inconnu mais il semble malgré tout très réduit compte tenu que la majeure partie de la surface au sol est libre et que le ralentissement de l'air est faible et n'intéresse que les couches de la basse atmosphère.



Aérogénérateurs de grande puissance

GROWIAN-I - 3MW - R.F.A. MOD 0A - 200 kW - U.S.A.

5. L'esthétique. - Les aérogénérateurs sont, de par leur conception, des objets aux volumes équilibrés et aux formes minces (aérodynamiques). La rotation lente du rotor (de 20 à 60 tr/mn) n'est pas inquiétante ni agressive dans le paysage.Pour les parcs d'aérogénérateurs, l'espacement obligatoire des éoliennes et leur implantation nécessairement en accord avec la topographie, devrait diminuer notablement la pénible sensation visuelle de concentration et de répétition.Un effort centré sur la dissimulation des connexions électriques devrait intégrer sans heurt ces machines dans l'environnement.

6. Le bruit. - Les machines modernes ne sont pas bruyantes. Dans la totalité des cas, à une dizaine de diamètres de distance, le bruit tend à se confondre avec le bruit ambiant dû au vent.En fait, le bruit d'un aérogénérateur en fonctionnement peut être dissocié en :

-bruit aérodynamique : c'est un bruit de sifflement et de chuintement suffisament faible pour qu'au pied de la machine ou à quelque distance, les conversations se tiennent à voix normale.

-bruit mécanique : c'est le bruit classique des machines tournantes (multiplicateur de vitesse, génératrice, pompes,etc).

On peut s'en prémunir en utilisant des équipements peu bruyants ainsi qu'en appliquant les méthodes maintenant bien maîtrisées d'insonorisation. A partir de 6 m/s de vent, le bruit ambiant couvre le bruit de l'éolienne (55 dbA).

D'autre part, la façon dont s'élèverait le niveau acoustique moyen dans le cas d'un parc de 10, 20 ou 100 machines n'est pas connu avec précision actuellement.

7. Les interférences radio-électriques. - Ce point est certainement le plus contraignant compte tenu de l'importance du réseau hertzien en France.

La masse métallique des éoliennes et le mouvement du rotor, si les pales sont métalliques, interfèrent par réflexion et déphasage sur les ondes radio. Des mesures ont été faites, dans des pays étrangers, mais la doctrine n'est pas clairement établie.Ce point devrait faire l'objet, en France, de recherches méthodiques afin de ne pas se voir refuser inconsidérément des sites intéressants ou au contraire, une fois la ou les machines construites, se trouver dans des situations inextricables.

PUISSANCE NOMINALE - PUISSANCE MOYENNE

8. Expression de la puissance d'une éolienne. - Avant d'aller plus avant, il faut avoir constamment à l'esprit que :

-compte tenu de la faible masse volumique de l'air, l'énergie véhiculée dans une veine du fluide est faible ce qui nécessite des surfaces de captation importantes.

-la vitesse joue un rôle considérable dans la puissance récupérable car elle apparaît au cube; par exemple, entre un vent de 4 m/s et un vent de 7 m/s, la puissance récupérable quintuple.Rappelons que les vitesses élevées du vent sont peu fréquentes.

La notion de puissance d'une éolienne n'a donc de sens précis, pour les comparaisons, que relativement à une vitesse de vent donnée à une altitude donnée. On préfèrera le plus souvent utiliser des ratios de comparaison relatifs à la surface de captage plutôt que liés à la puissance.

Pour obtenir la puissance réellement disponible, il faut ensuite appliquer la correction des rendements de tous les éléments de la chaîne de transformation. Le diagramme ci-dessous montre la cascade des rendements pour une éolienne :

100%	Energie cinétique du vent
60%	Limite de Betz (0,597)
48%	Hélice (0,80)
45%	Multiplicateur (0,95)
40%	Génératrice (0,90)
	Stockage :
30%	Batteries (0,75)
21%	Onduleur (0,70)

9. Puissance moyenne annuelle. - On appelle puissance moyenne annuelle le rapport :

$$P_m = \frac{\text{Energie annuelle , en kWh}}{8760}$$

En règle générale, si la machine est bien adaptée au site P_m vaut 0,2 à 0,4 fois la puissance nominale.Une autre notion, couramment employée, est le nombre d'heures équivalentes à pleine puissance. Il s'agit de :

$$H_{epp} = \frac{\text{Energie annuelle , en kWh}}{\text{Puissance nominale}}$$

Cette durée équivalente à pleine puissance est souvent de l'ordre de 3000 heures pour les gros aérogénérateurs. L'écart-type (dispersion autour de la moyenne) est important; de manière générale cet écart-type est compris entre $0,4P_m$ et P_m, l'utilisation de la notion de puissance moyenne demande donc quelques précautions.

IV. DONNEES ECONOMIQUES POUR LES GRANDS AEROGENERATEURS

Avant de regarder les possibilités de raccordement, on va analyser l'investissement et les possibilités de réduction de cet investissement, facteur de rentabilité de l'opération de raccordement.

Les exemples chiffrés utilisent les données de la machine d'Ouessant. En effet, sa durée d'utilisation équivalente à pleine puissance, son rapport puissance/poids et son prix placent cet aérogénérateur de 100 kWe sur un pied d'égalité avec des machines beaucoup plus puissantes.

1. L'investissement. - Les publications étrangères sont très discrètes sur le prix véritable des aérogénérateurs réalisés mais donnent par contre généreusement le prix pour la centième unité à construire.

L'opération prototype d'Ouessant avait conduit à un investissement de 13 000 F/kW. Une estimation de reconstruction sur le continent en 1982, amène l'investissement à 18 000 F/kW.Rappelons que ce type de ratio est délicat à manier car il fait intervenir la notion de puissance.Il serait certainement plus précis d'utiliser pour comparer des aérogénérateurs, le ratio F/m² de surface balayée.

Les chiffres du tableau 3 permettent la comparaison entre une machine de taille modeste (type Ouessant) et la plus grosse éolienne actuellement en service dans le monde.On retiendra que l'investissement oscille entre 12 000 F/kW et 18 000 F/kW pour une centrale éolienne opérationnelle.On pourrait tout aussi bien retenir le chiffre moyen de 6 000 F/m² d'hélice.

Tableau 3

Structure des coûts comparés de deux aérogénérateurs

	100 KF P13 Aérowatt 100 kW - D : 18 m	Mod. 2 Boeing 2500kW-D:91 m
Aéromoteur : rotor,régulation, arbre basse vitesse	33,9%	27,6%
Multiplicateur,génératrice, appareil électrique	7,8%	25,3%
Nacelle, système d'orientation	11,5%	12,6%
Pylône	16,6%	12,6%
Fondations, préparation du site	12,6%	10,3%
Montage et mise en service	8,3%	9,3%
Evacuation de l'énergie	9,3%	2,3%
	-o-o-o-o-o-o-	
Poids/puissance	135 kg/kW	109 kg/kW
Investissement : installation clé en main	18 000 F/kW	14 500 F/kW (3 éol)
Investissement par m² d'hélice	7 090 F/m²	5 590 F/m²
Aéromoteur+transmission par m² d'hélice	2 960 F/m²	7 680 F/m²
Prix par kilogramme	133 F/kg	133 F/kg (3 éol.)

La réduction de l'investissement peut se concevoir de plusieurs manières
-de manière directe par les classiques effet de série et effet de taille;
-par évolution de la conception technique;
-par effets induits.

Pour les éoliennes, la position d'E.D.F. a toujours été réservée sur l'efficacité à réduire les investissements par l'effet de série et par l'effet de taille.

2. Effet de série - En ce qui concerne les aérogénérateurs, E.D.F. et le constructeur associé ont toujours cherché à créer un effet de série induit en utilisant des composants standards issus d'une production industrielle. Il nous apparaît donc que le seul poste susceptible de voir son coût se réduire substantiellement est l'aéromoteur qui ne compte que pour 30% dans le coût de construction total.Une certaine réduction sur la chaudronnerie pourrait être envisageable bien que les prix constatés soient ceux couramment pratiqués sur le marché. D'autre part, lorsque l'on parle de série, il s'agit plus de série au sens aéronautique qu'automobile, ce qui limite la création d'outillages spéciaux qui seraient difficiles à amortir. A moyen terme, il apparaît donc que l'effet de série sera limité, peut-être à une réduction de 10 à 15% du prix départ usine, et son action sera immédiatement ressentie sur la petite série (50 à 100 machines) mais ne progressera guère ensuite sauf à atteindre les cadences de l'industrie automobile.

3. Effet de taille. - La course au gigantisme en matière d'aérogénérateurs a plusieurs sources :

-les excellents sites éoliens sont rares et l'expérience montre qu'il est aussi difficile d'obtenir une autorisation de construire un aérogénérateur qu'une centrale électrogène classique par méconnaissance des éoliennes et de leur nuisances.

-les grands aérogénérateurs "profitent" de l'effet de gradient vertical de vitesse du vent.Si le gain est indiscutable sur le plan de l'énergie par contre la variation de charge importante d'une pale pendant une révolution induit des effets de fatigue accrus.

-on compare trop souvent la puissance unitaire d'un aérogénérateur à ceux des tranches thermiques classiques, ce qui incite à accroître la puissance nominale par machine pour sortir au plus tôt de la marginalité.

-l'effet de taille est pour beaucoup de concepteurs un espoir de réduction de l'investissement. Compte tenu de la technique disponible à court terme, nous pensons que l'effet bénéfique de l'augmentation de la taille n'est pas clairement établi. Le problème du choix du diamètre optimal est difficile car les tailles optimales des différents organes ne sont pas toujours cohérentes. L'infrastructure, le support, l'appareillage électrique (puissance et contrôle commande) sont "bon marché" quand la puissance est aussi élevée que possible. Au contraire, les grandes hélices coûtent très cher et comme elles tournent lentement (18 tr/mn pour la Mod. 2 de 90 mètres

de diamètre) la transmission et la génératrice (non-standard) sont alors de plus en plus coûteuses.Compte tenu des techniques disponibles, un bon compromis devrait être trouvé avec des aéromoteurs de 30 à 40 m de diamètre.

Les remarques précédentes sont directement illustrées par les comparaisons du tableau 3.

4. Amélioration de la conception technique. - C'est certainement dans ce domaine que les efforts seraient les plus payants.

Malheureusement, bien peu d'industriels sont suffisamment structurés et ont une surface financière telle qu'ils puissent entreprendre d'améliorer substantiellement leurs produits ou en développer de nouveaux.Il est bien entendu par ailleurs qu'il est dangereux de soutenir artificiellement un marché mort-né, soit parce que les besoins sont inexistants, soit parce que les produits sont inadaptés. Cela signifie que le premier effort à faire est de clairement définir le créneau visé et en déduire les contraintes conceptuelles. Si la démarche qui va de l'étude à la réalisation est cohérente alors le produit créé aura toutes les chances d'être viable.Quoi qu'il en soit, l'objectif final est toujours d'obtenir un investissement minimal.

Ces quelques remarques montrent, si cela était nécessaire, que la véritable garantie de compétitivité réside dans l'étude préalable du marché et dans la justesse de la stratégie technique plutôt que dans le démarrage d'un marché s'appuyant sur des effets de série douteux.

5. Effets induits. - On regroupe dans ce paragraphe, un certain nombre d'idées difficiles à qualifier mais dont le fil directeur est qu'une collectivité compense une partie du déficit dû à l'investissement par des gains induits tels que économie de devises, créations d'emplois,etc.

Economie de devises. - Par économie de devises, on sous-entend la possibilité de limiter les importations en choisissant une filière peu gourmande en fuel par exemple. une première approche est d'utiliser le tableau de la comptabilité nationale de façon à affecter à chaque poste principal de l'investissement (génie civil, mécanique, etc) le contenu en devises (importation) des consommations induites.

C'est ainsi que pour les éoliennes, le coût en devises ramené au kWh produit serait d'environ 0,10 F/kWh.C'est-à-dire que pour produire 1 kWh avec une éolienne, on dépense 0,10 F en importation. De ce point de vue, les aérogénérateurs sont très "économes" en devises. (A titre de comparaison le coût en devises pour le nucléaire, le charbon et le fuel, serait respectivement de l'ordre de 0,06 F, 0,15 F et 0,46 F pour un taux d'actualisation de 9%. Note de la rédaction).

Création d'emplois - Coût social. - Il faudrait utiliser ici toutes les ressources des modèles macro-économiques car une filière comportant des investissements élevés, cas typiques pour les énergies renouvelables, peut être source de création d'emplois mais, par contre, immobiliser des capacités de financement peut-être plus utiles

dans d'autres secteurs.Il convient donc d'être très prudent. Ce que l'on peut dire c'est que mises à part les pales, une éolienne de taille moyenne peut très bien être construite par des entreprises de mécanique et de chaudronnerie de taille modeste et sans spécialisation particulière.Pour les petites et moyennes entreprises, une activité régulatrice comme celle apportée par des fabrications d'éoliennes garanties sur plusieurs années, stabiliserait très certainement l'emploi.En outre, la modularité des sous-ensembles mécaniques permet une décentralisation sans problème majeur de la production.

Exportation. - Les éoliennes sont un produit bien adapté à l'exportation : produit fini à forte valeur ajoutée, transport aisé, existence d'un marché potentiel important. Actuellement, les aérogénérateurs de moyenne puissance, palier de 100 kW, sont déjà rentables sur certains micro-réseaux alimentés par des diesels ainsi que pour des applications de pompage.

6. Les possibilités d'utilisation des grands aérogénérateurs. - Les points de vue et les conclusions des bilans économiques peuvent fortement différer selon que l'on prend le point de vue d'un établissement comme E.D.F. ou le point de vue d'un autoproducteur.

L'autoproducteur n'aura peut-être pas à incorporer dans son bilan des achats de terrain, des salaires, des frais financiers; ou bien encore l'achat d'un aérogénérateur pourra constituer un refuge financier pour des fonds par ailleurs improductifs.

En ce qui concerne le point de vue d'E.D.F., considéré comme propriétaire de l'équipement, il ressort des études entreprises les points de vue suivants :

-la compétitivité des éoliennes passe par leur marginalité car dans ce cas les moyens de production classiques assurent la modulation de la demande et la garantie de fourniture;

- dans les bilans économiques, le terme "économie de combustible" est prépondérant certes, mais il ne faut pas oublier le terme "puissance garantie" qui n'est pas négligeable lorsqu'on dispose d'un grand nombre d'aérogénérateurs;

-sur le réseau national, les aérogénérateurs sont encore deux à trois fois trop chers, mais par contre sur certains micro-réseaux diésels, la rentabilité est presque certaine dès aujourd'hui.

7. Généralités sur le rachat aux autoproducteurs. - Dans le cas d'un autoproducteur, il se verra soumis aux réglementations en vigueur, en particulier le rachat de l'énergie s'effectuera suivant les modalités du tarif vert en moyenne tension.

Les entreprises d'électricité dont la production annuelle avant 1946 était inférieure à 12 millions de kWh n'ont pas été nationalisées.L'installation d'aménagements nouveaux d'une puissance inférieure à 8 000 kVA est libre. E.D.F. est tenu d'acheter l'énergie disponible ainsi produite.

Selon ces principes, plusieurs centaines d'installations de production autonomes, généralement hydrauliques et d'une puissance allant d'une centaine de kVA à 8 000 kVA, ont été aménagées et livrent la totalité de leur production à E.D.F.

Le choix de la tension d'évacuation de l'énergie produite dans le réseau national incombe à E.D.F. en fonction du diagramme prévisionnel d'exploitation de la centrale, des pertes et des variations de tension engendrées sur les réseaux par le fonctionnement de la centrale.L'équipement et l'exploitation des ouvrages de raccordement sont à la charge du producteur.

Les installations du producteur ne doivent pas gêner l'exploitation du réseau. Les appareils de couplage et de protection indispensables sont à la charge du producteur. Un règlement technique fixe les modalités d'application, en particulier les règles à suivre en cas de déclenchement et de remise en service.

E.D.F. peut exiger du producteur la fourniture d'une énergie réactive égale à 60% de l'énergie active fournie au même instant.L'énergie réactive non fournie donne lieu à un abattement sur le prix du kWh, à moins que le producteur ne paye sa quote-part des dépenses d'équipement, d'exploitation, d'entretien et de renouvellement du moyen de compensation utilisé par E.D.F.

Les appels de courant réactif sur le réseau E.D.F. au démarrage des alternateurs asynchrones sont tolérés s'ils sont de courte durée (une minute), peu fréquents, se situent en dehors des heures pleines ou de pointe et n'entraînent pas de troubles d'exploitation.

Les producteurs hydrauliques, vendant à E.D.F., en moyenne tension, la totalité de leur production sous une puissance ne dépassant pas 4500 kW, bénéficient d'un tarif dit "tarif d'achat simplifié" comportant deux prix du kWh, un pour l'hiver, un pour l'été- depuis le 16 Août 1980, 22,79 c/kWh en hiver; 11,41 c/kWh en été- Ces prix sont affectés de coefficients de majoration de "qualité" qui sont fonction de la régularité interannuelle du cours d'eau sur lequel l'aménagement est implanté et qui peuvent atteindre 12% en hiver et 20% en été.

Les autres producteurs se voient appliquer un tarif dit "tarif d'achat intégral" déduit du tarif de vente pour longues utilisations (tarif d'appoint). Ce tarif comporte:

-une prime fixe, fonction de la puissance que le producteur s'engage à mettre à la disposition d'E.D.F. dans les différents postes tarifaires et déduite de la prime fixe du tarif d'appoint en appliquant un coefficient d'abattement tenant compte de la répercussion de la fourniture sur les réseaux d'E.D.F. (10%), des frais de distribution(fonction de la distance moyenne de distribution) et des frais généraux d'E.D.F. (3%).

-des prix de kWh déduits des prix de kWh du tarif d'appoint en appliquant un coefficient d'abattement tenant compte de la distance moyenne de distribution et des frais généraux d'E.D.F. (3%).

L'autoproducteur peut se prémunir contre les défaillances de fournitures garanties en souscrivant auprès d'E.D.F. un tarif de secours.

Les fournitures d'énergie non garanties ne donnent pas lieu à prime fixe. Les kWh livrés sont rémunérés comme ci-dessus avec toutefois un coefficient de 0,8 pour les kWh d'été.

Des études récentes montrent que les conditions et les méthodes de rachat sont homogènes en Europe et aux U.S.A. Les surprimes pour les énergies renouvelables sont en fait d'origine gouvernementale, ce qui explique l'essor éolien du Danemark ou de la Californie.Ces subventions ont une durée d'application limitée et n'ont d'autre objet que le lancement d'une industrie éolienne autonome et dynamique.

CHAPITRE XIII

Le pompage de l'eau

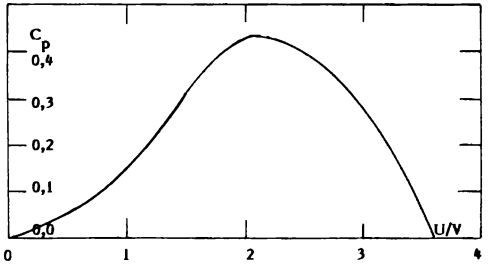
L'utilisation des éoliennes pour le pompage de l'eau est des plus traditionnelle. Dès l'apparition des premières éoliennes, la nécessité vitale de l'exhaure de l'eau conduit à rechercher des techniques de substitution à la main-d'oeuvre. De plus, le stockage de l'eau est aisé, contrairement à la chaleur sensible ou à l'électricité, palliant ainsi les aléas du vent. Enfin, l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins de pompage est relativement peu importante.

Les éoliennes multipales sont les plus courantes pour ce type d'utilisation mais le pompage à l'aide d'éoliennes rapides présente certains avantages et tend à se développer dans les régions où les vents moyens et forts ont une fréquence suffisante.

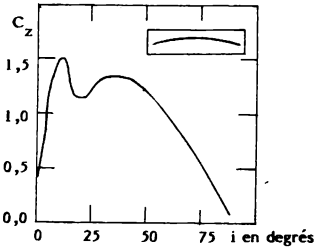
I. EOLIENNES MULTIPALES DE POMPAGE.

1. Caractéristiques des éoliennes multipales. Ce sont des éoliennes équipées de 6 à 24 pales selon les modèles, le diamètre de certaines machines pouvant atteindre 8 à 9 mètres au maximum.

Le facteur de conversion maximal pour ce type d'éolienne est de l'ordre de 0,3 et correspond à un paramètre de fonctionnement souvent voisin de l'unité.; les vitesses de rotation sont donc faibles. Par exemple, pour un vent de 7 m/s, une roue de 4 m de diamètre et un paramètre de fonctionnement égal à un, la vitesse de rotation sera de 33 tr/mn.



Facteur de conversion



Coefficient de portance

Eolienne de pompage 8 pales (tôle 10% de courbure)

La puissance de l'éolienne est donnée par :

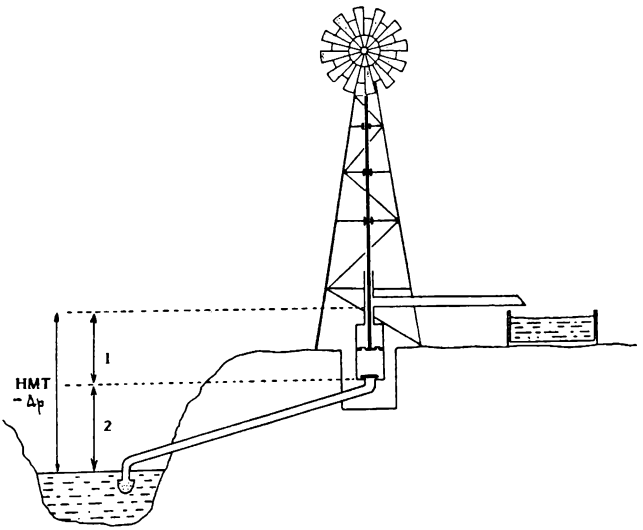
$$P = C_p [0,5.\ 3,14\ .\ d\ R^2\ V^3\ ]$$

Pour un facteur de conversion égal à 0,3 et une densité de l'air d = 1,225 kg/m³, la puissance maximum de ce type d'éolienne est :

$$P = 0,145\ D^2\ V^3$$

où D est le diamètre de l'éolienne; R est son rayon. La puissance est exprimée en watts pour des dimensions en mètres.

Ces éoliennes démarrent pour des vents faibles, de l'ordre de 2,5 à 3 m/s. Le couple de l'éolienne est maximum au démarrage et diminue lorsque la vitesse de rotation augmente.



Pompage déporté par éolienne multipale -1: hauteur de refoulement - 2:hauteur d'aspiration - Pompe à piston couplée par tringlerie -

2. Besoins de pompage et puissance de l'éolienne. - La puissance d'une éolienne de pompage doit être choisie en fonction de la hauteur manométrique totale (H_{MT}) qui est la somme de :

-la hauteur géométrique d'aspiration qui est théoriquement de 10,33m au maximum, mais qui n'excède guère 6m pratiquement pour des pompes à piston;

-la hauteur géométrique de refoulement qui dépendra de la puissance de l'éolienne;

-les **pertes de charge** (liées aux dimensions des conduits et à la vitesse d'écoulement).

Pour un débit donné, Q, en m³/s, la puissance nécessaire en fonction de la hauteur manométrique totale, H_{MT}, sera :

$$P = g\ m\ Q\ H_{MT}$$

où $g = 9{,}81\ m/s^2$ est l'accélération de la pesanteur; m est l'inverse du rendement mécanique de la pompe et est de l'ordre de 1,5 pour une pompe à piston classique; Q est le débit en m^3/s; H_{MT} est la hauteur manométrique totale en mètres.

Ayant déterminé les besoins de pompage, B en m^3, pour une période donnée, on en déduit l'énergie nécessaire durant cette période :

$$E = g\ m\ H_{MT} \int Q(t)\ dt = g\ m\ H_{MT} B$$

Etant donnée l'irrégularité du vent, tant au cours des mois que d'une année à l'autre, il faudra prévoir un diamètre d'éolienne largement dimensionné par rapport à celui que l'on déterminerait à partir des valeurs moyennes de l'énergie éolienne.

Une simulation précise, au moyen d'un ordinateur, nécessite la connaissance des vitesses de vent, durant plusieurs années, pour le site d'implantation, des vitesses de vent mesurées à des intervalles réguliers. A partir des courbes de puissance données par un constructeur, pour un ensemble de pompage, on peut calculer le débit de ce système pendant chaque intervalle de mesure du vent.

On détermine alors les besoins de la consommation d'eau et on se fixe la capacité du réservoir. L'ordinateur peut alors calculer, pour chaque intervalle de temps, si l'on a stocké ou puisé de l'eau dans ce réservoir. Pour pouvoir déterminer la production d'un équipement de pompage sur un site donné, il est donc nécessaire d'avoir un échantillonnage important des vitesses de vent. A défaut de ces données, une estimation du vent moyen, compte tenu des données météorologiques locales, permettra un calcul approché de la puissance nécessaire de l'éolienne.

3. Couplage avec une pompe à piston. - La pompe couplée aux éoliennes lentes est généralement une pompe à piston qui permet une hauteur de refoulement importante. Cette pompe nécessite un couple élevé et une faible vitesse de va-et-vient. Elle est donc particulièrement bien adaptée aux éoliennes multipales.

Le mouvement de rotation de l'éolienne est transmis à la pompe par un système bielle-manivelle logé dans la tête de l'éolienne.Pour les éoliennes de moyenne puissance, on utilise éventuellement un système d'engrenages démultiplicateurs qui permet un démarrage de l'éolienne pour des vitesses de vent plus faibles. Par exemple, le modèle "Géantéol" de la société Humblot, peut être équipé d'un démultiplicateur à cinq vitesses différentes par changement de pignon.

La tuyauterie d'aspiration et de refoulement est, en général, montée directement aux extrémités du corps de pompe.Un dispositif de refoulement peut permettre de déverser l'eau pompée à une grande distance du pylône ou de la surélever à une hauteur supérieure à celle du pylône.

4. Débits et profondeurs de pompage. - Selon le diamètre des éoliennes et le rendement des systèmes, on obtient une gamme très étendue de débits et de profondeurs de pompage correspondant aux divers modèles proposés par les constructeurs.

Les modèles construits par la société HUMBLOT ont des caractéristiques très variées et nous en mentionnons quelques types :

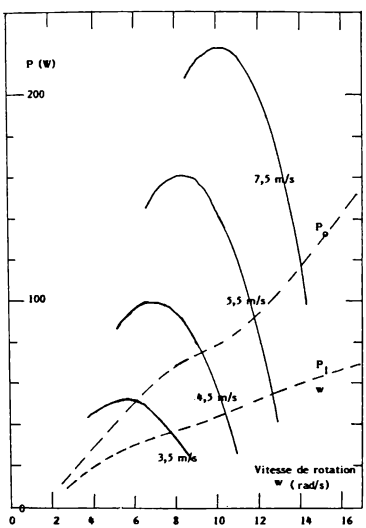
-"Cadéteol" : modèle à 6 pales, d'un diamètre de 1,75 m; fixation sur pylône tubulaire, l'axe de la roue étant à 5 m du sol.Le diamètre de la pompe est de 9,2cm et nécessite un forage de 11 cm minimum.La pompe commence à débiter pour un vent de 2,5 m/s et atteint un maximum de 500 l/h pour une profondeur de forage de 6 m au maximum et une hauteur de sortie d'eau de 1 m au-dessus du sol.

-"Junioréol" : ce sont des éoliennes munies de 12 pales, en tôle galvanisée, et elles sont disponbiles en cinq diamètres différents selon la HMT nécessaire.Elles donnent des débits compris entre 600 et 2000 l/h. Par exemple, une roue de 1,75 m est suffisante jusqu'à une HMT de 15 m et une roue de 2,75 m jusqu'à une HMT de 55m. Avec les têtes à débit fixe, on obtient une exhaure allant jusqu'à 1200l/h pour des HMT faibles; avec les têtes à débit réglable, on peut atteindre 2000 l/h.

-"Géantéol" : ce modèle comporte 16 pales, à pas hélicoïdal, permettant un démarrage pour des vents de l'ordre de 2,5 m/s. Les diamètres sont de 3,5 m, 4 m ou 5 m. Les diamètres de pompes adaptables s'échelonnent de 5 à 30 cm.

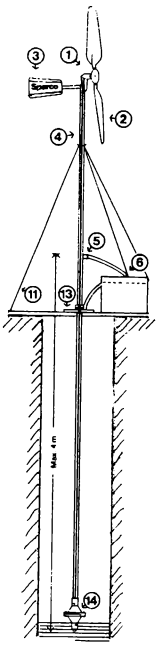
Cette dernière éolienne peut être munie d'une tête avec ou sans démultiplicateur, celle-ci étant recommandée pour les forages supérieures à 30 m. La HMT maxima le est de 180 m; le débit est réglable par variation de la course du piston de la pompe. Un débit maximum de 25 m^3/h peut être atteint pour un site bien venté.

La société SUD-AERO proposé également une série d'éoliennes de pompage à 8 ou 16 pales. Les éoliennes "Alizé" ont des diamètres variant de 1,95 m à 3 m et permettent des débits horaires de l'ordre de 500 à 3500 litres; la profondeur maximum de pompage est de 50 m.



Eolienne de pompage à 6 pales couplée avec une pompe à membrane.

P_o : puissance d'entrée -P_1 : Puissance d'exhaure.



Eolienne bipale SPARCO à pompe à membrane

1.Arbre-manivelle
2.pales
3.Dérive
4.Support
5.Sortie
6.Réservoir
13.Support
11.Haubans
14.pompe à membrane

5. Couplage avec une pompe à membrane. - De petites éoliennes de pompage utilisent des pompes à membrane. Elles peuvent être utilisées pour de faibles profondeurs, la hauteur de refoulement étant de 4 m au maximum pour les éoliennes proposées par la société SPARCO, au Danemark.

Un modèle, par exemple, est constitué d'un rotor à 2, 3 ou 4 pales en polyuréthane. Leur capacité horaire de pompage varie de 180 l/h à 700 l/h pour des vitesses de vent de l'ordre de 4 m/s.

II. - LES EOLIENNES RAPIDES DE POMPAGE

1. Avantages et inconvénients des éoliennes multipales. - Les éoliennes lentes de pompage présentent un certain nombre d'inconvénients par rapport aux éoliennes rapides :

-leur facteur de conversion est moins élevé et la diminution de ce facteur est rapide lorsque l'on s'éloigne du maximum;

-pour des roues de l'ordre de 2,5 m de diamètre, la HMT ne dépasse pas 50m;

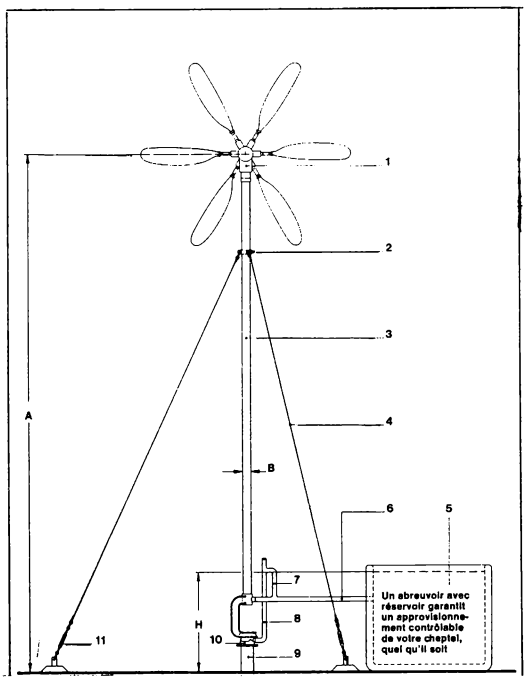
-la liaison entre le moteur éolien étant assurée par un train de tiges, l'éolienne est installée en général à la verticale du puits. Un système d'apiration par une conduite oblique peut cependant permettre d'éloigner l'éolienne de la verticale du puits;
-le débit des éoliennes multipales varie d'une façon importante avec la vitesse du vent, ce qui peut être un inconvénient pour un puits à faible débit;

-la régulation des éoliennes multipales se fait par tout ou rien, car au-delà d'une vitesse de vent de 10 m/s, en général, le moteur éolien se place dans le lit du vent par l'action du gouvernail et l'éolienne ne pompe plus;

-les éoliennes lentes ne sont pratiquement utilisables qu'en site surveillé; tous les constructeurs d'éoliennes recommande en effet de les immobiliser au moyen du frein mécanique en cas de vitesse élevée du vent.

Par contre les avantages évidents des éoliennes multipales de pompage sont : leur simplicité de construction et par suite leur faible prix de revient, leur robustesse et leur fiabilité, leur faible vitesse . Ces atouts expliquent aisément la permanence de ce type d'éolienne pour le pompage.

2. Couplage avec pompe à piston. - La société allemande LÜBING fabrique des éoliennes de pompage associant un moteur éolien rapide à une pompe à piston. Ces machines sont équipées d'un démultiplicateur entre le rotor et le système bielle-manivelle. Les modèles sont les suivants :



Eolienne de pompage LUBING
à pompe à piston

1. Système de commande
2. Cercle de renforcement
3. Pylône
4. Hauban
5. Réservoir
6. Conduite de déversement
7. Tuyau de trop-plein
8. Tuyau de retour
9. Conduite allant au puits
10. Pied de pylône
11. Ridoir

- Modèle à 6 pales : le rotor a un diamètre de 1,5 m et est monté sur un pylône de 6,7 m, à hauteur du moyeu.L'éolienne peut être équipée de toutes les pompes aspirantes et refoulantes à piston.

-Modèle à 4 pales, d'un diamètre de 1,5 m. Pour un vent moyen de 4 m/s, on obtient un débit d'environ 200 l/h pour une HMT de 7 m.

-Modèle à 3 pales de 1,3 m de diamètre.

3. Couplage avec pompe centrifuge. - Par suite de la caractéristique cubique de puissance des éoliennes rapides, le couplage avec des pompes volumétriques dont la caractéristique est approximativement linéaire ne peut conduire à un bon rendement global. La pompe centrifuge possède divers avantages qui lui ont permis de se substituer à la pompe à piston pour le couplage aux éoliennes rapides :

-la pompe centrifuge a une caractéristique de puissance P(N) qui est une cubique ce qui permet de faire coïncider la zone de rendement optimal de l'éolienne avec la caractéristique P(N);

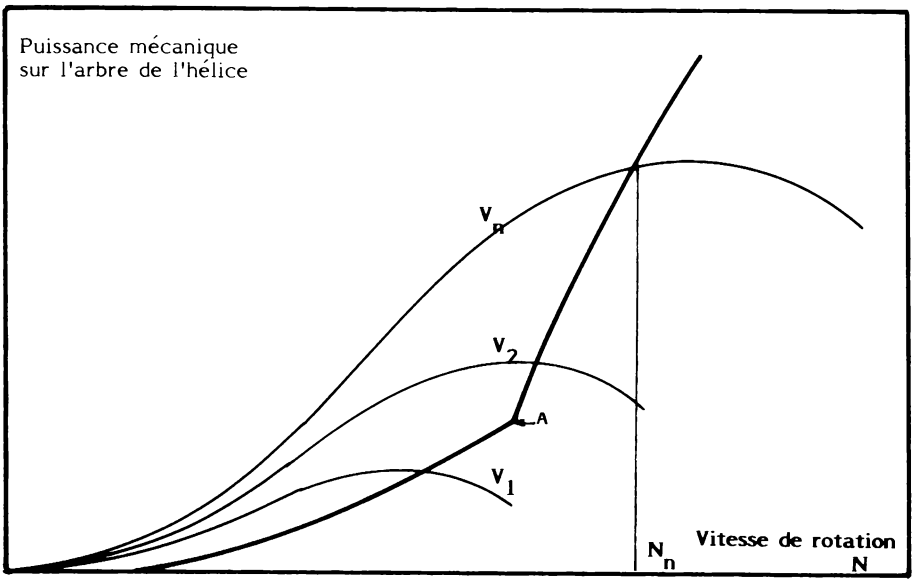
-le couple de la pompe centrifuge est faible aux basses vitesses ce qui coïncide avec les caractéristiques du couple des éoliennes rapides;

-les vitesses de rotation des pompes centrifuges sont élevées, ce qui permet une bonne adaptation aux vitesses des éoliennes rapides;

-le couplage mécanique est plus robuste qu'un couplage de type bielle-manivelle;

-la pompe centrifuge est moins encombrante et moins coûteuse que la pompe à piston.

Le couplage avec une pompe centrifuge peut se faire mécaniquement ou électriquement. Ce dernier mode de couplage donne un rendement moindre que le couplage mécanique mais il permet de dissocier l'emplacement de l'éolienne et le lieu de pompage. Dans de nombreux cas, le lieu de pompage peut en effet être situé dans des parties basses du relief et par suite, l'éolienne aura avantage à être placée sur les hauteurs avoisinantes. Le rendement final pourra donc être supérieur à un pompage avec couplage mécanique.



Couplage éolienne AEROWATT et pompe centrifuge GUINARD

Point A : début de pompage. La HMT de la pompe à débit nul devient égal à la hauteur d'aspiration dans le puits.

III. - POMPES CENTRIFUGES VERTICALES A ARBRE LONG.

1. Eoliennes de pompage Aérowatt-Guinard. - La société AEROWATT propose un système de pompage associant leurs éoliennes rapides aux pompes centrifuges verticales à arbre long GUINARD. Ce couplage est performant puisque :

-les pompes centrifuges utilisées ont une caractéristique de puissance P(N) qui est une cubique comme celle des hélices rapides;

-leur couple de démarrage ne résulte que des frottements et peut donc être très réduit, ce qui permet un démarrage sans artifice particulier.

Le rendement hydraulique maximal passe de 0,55 pour les pompes de débit nominal voisin de 1 m^3/h à 0,78 pour celles ayant un débit d'environ 40 m^3/h.Les pertes dans l'arbre de transmission sont limitées par l'emploi d'arbres adaptés à une large gamme de vitesses de fonctionnement, la vitesse critique se situant en dehors de la plage de fonctionnement.

Le diamètre des forages nécessaires est relativement peu important, les pompes ayant les diamètres extérieurs suivants : 9,5 cm pour un débit nominal de 1,5 m^3/h; 14,2 cm pour 36 m^3/h; 19,2 cm pour 50 m^3/h.

Le début du pompage a lieu alors que la puissance disponible sur l'arbre du moteur éolien atteint entre le huitième et le cinquième de la puissance nominale. Compte tenu des ces puissances, la vitesse de vent de début de pompage sera comprise entre 0,5 et 0,58 V_N, ce qui donnera les caractéristiques de débit Q(V) des ensembles de pompage représentées sur la figure suivante.

Deux sortes de couplage peuvent être utilisés; la pompe est actionnée mécaniquement par l'intermédiaire d'un système multiplicateur ou électriquement avec utilisation d'un aérogénérateur.

2. Couplage mécanique. - Le moteur éolien entraîne un multiplicateur mécanique qui adapte la vitesse de rotation nominale de la pompe centrifuge à arbre long.

Un renvoi d'angle à 90° associé au multiplicateur de vitesse attaque l'arbre de la pompe qui est prolongé jusqu'au sommet du pylône. Le rendement du multiplicateur et du renvoi d'angle est au total de l'ordre de 0,95.

L'association d'une pompe centrifuge et du moteur éolien par un arbre nécessite que ces deux systèmes soient montés à la verticale de la tête de puits mais cet inconvénient, par rapport au couplage électrique, est compensé par un rendement supérieur. La transmission mécanique absorbe en effet beaucoup moins de puissance que la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique par l'aérogénérateur puis la conversion inverse pour actionner la pompe.

Les performances nominales des ensembles de pompage mécaniques sont établies à partir de la puissance disponible sur l'arbre du moteur éolien pour le vent nominal V_N.

Le rendement de transmission mécanique est pris égal à 0,95. Les puissances mécaniques nominales, au niveau du sol, sur l'arbre de la pompe, sont données par le tableau suivant :

	Puisances (W) en watts		
V_N (m/s)	5	7	10
Diamètre (m)			
2			697,5
3,2		697,5	1 525
5	697,5	1 525	5 470 *
9,2	1 525 **	5 470	14 210
18	5 470 **	21 855	54 700

* puissance disponible pour V_N = 10,9 m/s ; ** puissance pour V_N = 4,6 m/s.

A l'aide des caractéristiques des pompes centrifuges à arbre long GUINARD et du tableau ci-dessus, on peut donc calculer les performances nominales des ensembles de pompage à couplage mécanique.On a le tableau suivant pour quelques modèles

		PUISSANCE MECANIQUE NOMINALE EN W		
		695	1525	5470
		TYPE D'HELICES		
Hmt en m		20/10 32/7 50/5	32/10 50/7 92/5	50/10 92/7 180/5
15	Pompe : type//nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn	*F 6.5//5* 9,8 *1950*	*F 6.25//4* 27,5 *1735*	*F8.105//2* 80 *1800*
25	Pompe : type//nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn	*F6 5//6* 5,5 *1800*	*F 6.11//5* 14,5 *1850*	*F8.50//3* 60 *1800*
75	Pompe : type//nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn		*STP 95 B//35* 3,5 *2000*	*F6.11//19* 18,2 *1800*
85	Pompe : type//nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn		*STP 95 B//46* 3,1 *1800*	*F6.11//19* 16 *1800*

3. Couplage électrique. - Dans ce type de couplage, le moteur éolien entraîne un alternateur dont le courant est redressé. La pompe centrifuge est munie d'un moteur à courant continu à aimant permanent jusqu'à 5 kW environ. Un dispositif entièrement statique n'autorise le débit du générateur électrique vers le moteur de la pompe que dans la mesure où la tension aux bornes du générateur est supérieur à un seuil préétabli. Cette précaution évite que le générateur électrique ne débite au démarrage, sur l'impédance du moteur à courant continu qui est très faible à l'arrêt.

Les puissances électriques nominales (en watts) que peuvent fournir les aérogénérateurs AEROWATT sont données dans le tableau suivant :

V_N en m/s	5	7	10
Diamètre du rotor en m			
2		150	500
3,2	130	500	1200
5	500	1200	4500 *
9,2	1200 **	4500	12000
18	4500 **	18000	45000

* pour cette machine,4500 FP 11, on a V_N = 10,9 m/s; ** V_N = 4,6 m/s.

Les moteurs électriques à aimants permanents, utilisables jusqu'à une puissance de 5 kW ont un rendement de l'ordre de 0,85.

A partir ces caractéristiques des pompes centrifuges à arbre long GUINARD on peut donc établir les performances des ensembles de pompage à couplage électrique données par le tableau suivant.

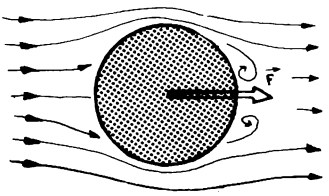
		PUISSANCE ELECTRIQUE NOMINALE EN W		
		500	1200	4500
		TYPES D'AEROGENERATEURS		
Hmt en m		500 FP 5 500 FP 7 500 FP 10	1100 FP 5 1100 FP 7 1100 FP 10	4500 FP 5 4100 FP 7 4500 FP 11
15	Pompe : type/nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn	*F6 5/33* 5.2 *1950*	*F6 11//3* 17.6 *1925*	*F8 50//2* 65.8 *1842*
25	Pompe : type/nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn	*STP 95 B//14* 3 *1800*	*F6 5//7* 8.8 *1950*	*F7 35//5* 45 *1781*
35	Pompe : type/nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn	*STP 95/A//12* 1.72 *2190*	*F6 5//8* 6.14 *1875*	*F6 25//9* 30.4 *1882*
75	Pompe : type/nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn		*STP 95 B//38* 2.1 *1800*	*F6 11//25* 12 *1450*
85	Pompe : type/nombre d'étages DEBIT (m3/h) Vitesse de rotation t/mn		*STP 95 A//46* 1.69 *1800*	*F6 5//19* 10.4 *2200*

CHAPITRE XIV

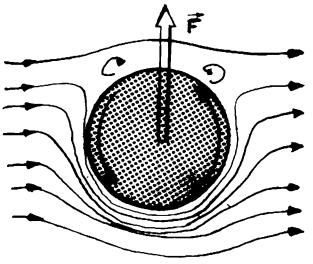
Quelques recherches expérimentales

1. L'effet MAGNUS. - Lorsqu'un cylindre en rotation autour de son axe principal de symétrie, est placé dans un fluide en mouvement, il va pertuber de façon dissymétrique, la distribution des filets fluides dans son entourage. Des filets sont entraînés dans le sens de la rotation du cylindre, créant une surpression d'un côté et une dépression de l'autre. C'est en partie l'équivalent de ce qui a lieu pour un profil aérodynamique en mouvement, le déplacement de ce dernier, par rapport à l'air, étant l'équivalent du mouvement de rotation.

Il va en résulter une force aérodynamique, perpendiculaire à la direction des filets de l'air en mouvement et dans le plan de section du cylindre. Une telle force est appelée force de MAGNUS, en souvenir du physicien allemand A. MAGNUS qui, en 1852, étudia l'influence des courants d'air sur les objets en rotation.



Cylindre immobile



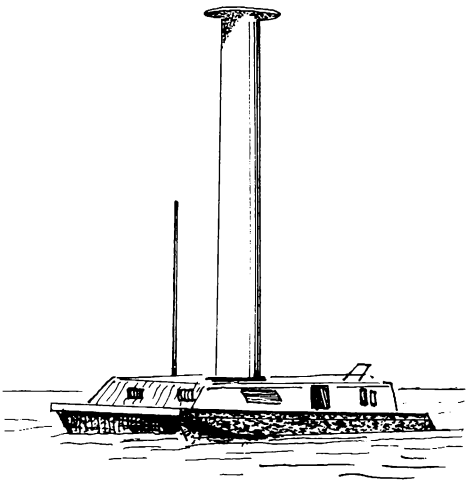
Cylindre tournant

L'application de ce phénomene à la navigation fut réalisée par Anton FLETTNER qui construisit un navire , le "Baden-Baden", équipé de deux cylindres verticaux à effet MAGNUS. Les cylindres avaient un diamètre de 2,8 m et une hauteur de 18 m; deux moteurs de 11 kW permettaient de les faire tourner. Pour un vent de l'ordre de 10 m/s, la force de Magnus développée était d'environ 10 fois celle fournie par les moteurs. En 1924, le "Baden-Baden" fit la traversée de l'Atlantique mais malgré son fonctionnement simple et sans défaillance, ce système ne fut pas développé pour la navigation.

Cette expérience a été reprise récemment, sous une forme un peu différente, par la Fondation Cousteau et financée sur fonds publics. Un prototype, un catamaran de 22,50 m sur 7,40 m, pesant 42 tonnes, muni d'un cylindre de 13,50 m de haut, a été expérimenté en juin 1983 à Marignane, au bord de l'étang de Berre. Ce navire, le "Moulin à Vent", n'utilise, avec un vent de 20 noeuds, que 8% de l'énergie nécessaire à déplacer le bateau.

La technique expérimentée sur le "Moulin à Vent" est originale et dérive de l'effet Magnus. Elle consiste en un cylindre fixe, orientable, appelé "cylindre aspiré", muni sur toute sa hauteur de grilles qui peuvent être alternativement obturées par des volets mobiles. Au sommet du cylindre, un ventilateur, mû par une centrale hydraulique, crée une dépression à l'intérieur du cylindre ce qui permet une aspiration de l'air engendrant une force propulsive. Les 30 m² de surface du cylindre sont équivalents à 150 m² de voilure classique.

La maniabilité du bateau est remarquable, car il remonte aisément le vent selon un angle de 30 degrés et il vire de bord à 70 degrés. On peut même aller en "marche arrière" ou bien, pour un bateau équipé de deux cylindres, tourner sur place. Le navire consomme une énergie de l'ordre du dixième de l'énergie éolienne récupérée. Ce système est envisagé en complément de moteurs classiques et servira d'économiseur d'énergie permettant une économie de l'ordre de 35% sur le combustible des moteurs.



Catamaran le "Moulin à Vent"

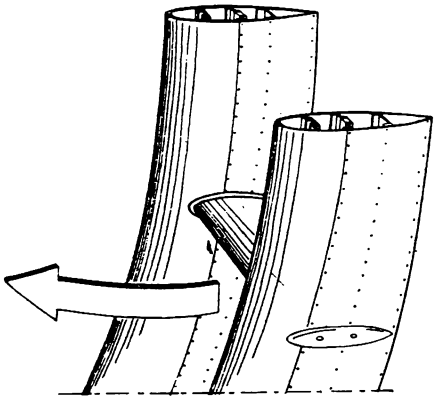
2. Eolienne à axe vertical à pales doubles - Projet "Poseidon L-180" -

L'institut de Recherches Aéronautiques de Suède étudie une nouvelle conception d'éolienne à axe vertical dérivée du type Darrieus. Le système de pales est formé de pales à deux profils près l'un de l'autre, incurvés en troposkien, et faisant

entre les pales doubles un angle de 90°, formant ainsi un "L" lorsque l'on regarde l'éolienne par-dessus. Ce système en L réduit considérablement les oscillations du rotor interagissant avec la structure portante, en comparaison avec une forme conventionnelle Darreius bipale (angle de 180° entre les pales).

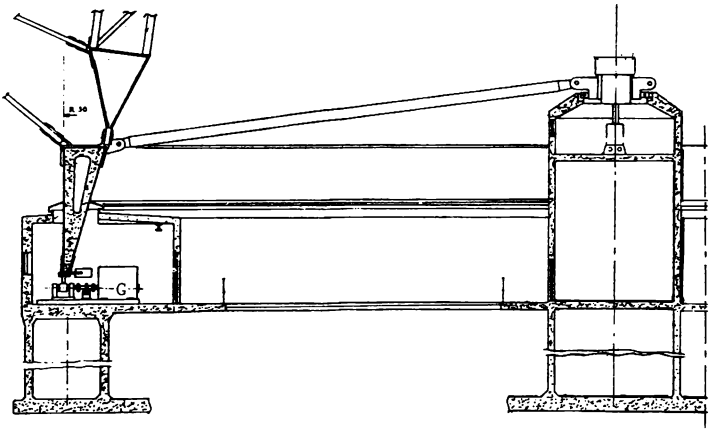
Les extrémités inférieures des pales sont attachées à un large cercle de base, supporté par un grand nombre de roulements situés sur un plan horizontal. Certains roulements sont couplés directement à des génératrices électriques. L'ensemble des pales est monté sur une tour autoportante.

Dans le projet d'éoliennes de 20 MW, "L-180-Poseidon", l'éolienne a une hauteur de 180 m et un champ d'éoliennes de ce type serait implanté en bordure de côte, sur la plateforme continentale où la hauteur d'eau ne dépasse pas 20m.



Pale à deux profils parallèles - "L-180-Poseidon"-

(O. LJUNGSTROM-1980)



Pied d'attache des pales et cercle de roulement- "L-180-Poseidon"

(O. LJUNGSTROM - 1980)

3. Système de compensation de mouvement de lacet. - Le rendement des éoliennes tournant face au vent est optimum si l'on arrive à maintenir correctement le plan de rotation des pales par rapport au vent lors des changements de direction. La rotation du plan des pales est assurée grâce à un axe de lacet vertical.

Le mécanisme à girouette, destiné à compenser le mouvement de lacet d'une éolienne s'est avéré relativement efficace lorsqu'il est appliqué à des machines comportant des pales relativement courtes et rigides. Toutefois, dans les grandes turbines éoliennes comportant des pales de 40 m ou plus, ces pales sont réalisées en structure composite et creuse ayant une importante élasticité.

Si de telles pales sont montées rigidement sur le moyeu en étant ainsi exposées à des gradients verticaux de vitesse du vent et à des forces de gravitation au cours d'une rotation normale, ces pales d'éolienne ont tendance à se cintrer ou à subir un battement cyclique, perturbant l'orientation de l'éolienne face au vent. Si, dans le but de rattraper les gradients verticaux de vitesse de vent, les pales sont montées de manière pivotante sur le moyeu et en relation de pivotement par rapport à un axe "d'oscillation" orienté transversalement à l'axe de rotation du moyeu et de l'arbre (ainsi qu'aux axes longitudinaux des pales), la rotation des pales ainsi montées supprime le battement élastique précité. Néanmoins, elle entraîne une précession horizontale du moyeu et des pales autour de l'axe d'oscillation. Cette précession est le résultat de la rotation et de l'oscillation combinées des pales sous l'influence des gradients verticaux de vitesse du vent et de la gravité.Elle a pour effet un déplacement angulaire de la turbine éolienne en dehors de son orientation correcte par rapport à la direction du vent, suite à un pivotement autour de l'axe de lacet.

Divers brevets ont été déposés pour pallier ce défaut d'orientation. Dans le brevet français, n° 2 484 552, déposé le 19 Mai 1981 par United Technologies Corporation (U.S.A.), divers perfectionnements ont été proposés pour compenser ce mouvement de lacet dans le but de régler et de maintenir l'orientation de l'éolienne dans la bonne direction de vent.

Dans cette invention, les éléments de compensation de mouvement de lacet comprennent un élément pour le montage des pales sur le moyeu par leur talon, de telle sorte que le mouvement oscillant de ces pales dans et hors du vent, sous l'influence de gradients verticaux de vitesse du vent, assure un réglage du pas des pales par rapport à la direction du vent.

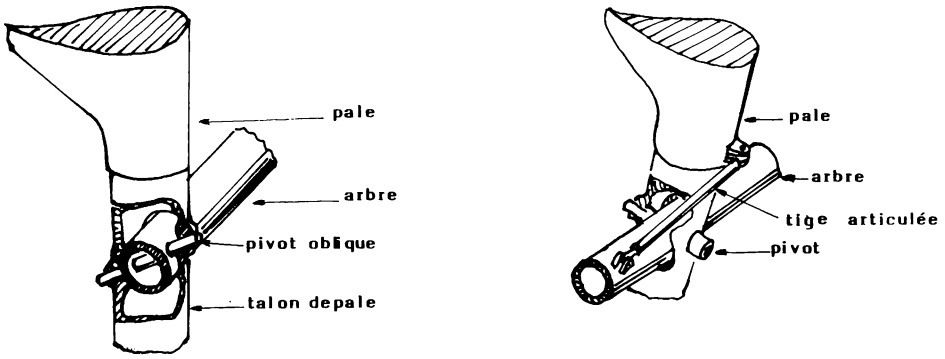
Ce réglage de pas réduit la portance exercée sur les pales soumises à l'influence de vents dont la vitesse et l'angle d'attaque sont élevés, tandis qu'il augmente la portance exercée sur les pales subissant l'influence de vents dont la vitesse et l'angle d'attaque sont moins importants en raison du gradient précité.

Cet équilibrage de la portance exercée sur les pales de la turbine minimise tout déséquilibre du mouvement de lacet ou précession horizontale du moyeu résultant de ce mouvement oscillant, en assurant ainsi le maintien de l'orientation correcte

de l'éolienne avec la direction du vent.

Dans une forme de réalisation, ce réglage de pas est obtenu moyennant un montage pivotant de la pale sur le moyeu, de telle sorte que la pale pivote, sous l'influence du gradient de vitesse, autour d'un axe oblique par rapport à l'axe longitudinal de la pale. La figure suivante est une vue isométrique, partiellement en coupe, de l'intérieur du moyeu de la turbine.

Dans une forme de réalisation, le réglage de pas est obtenu par un montage des pales conçu de telle sorte que ces dernières puissent pivoter autour de leur axe longitudinal, ces pales étant en outre articulées, par leur partie extérieure, au moyeu ou à une autre extrémité de l'arbre principal de la turbine.Le battement ou l'oscillation de la pale entraîne alors le pivotement désiré de cette dernière sur son axe longitudinal afin d'obtenir le réglage de pas requis pour minimiser le déséquilibre du mouvement de lacet ou la précession horizontale du moyeu. La figure suivante illustre ce type de réalisation.



Montages de pales à compensation de mouvement de lacet

4. Recherches diverses. - De nombreuses recherches portant sur l'utilisation de l'énergie du vent sont orientées vers des systèmes autres que les éoliennes classiques On peut citer, entre autres :

-la production de particules chargées qui, transportées par le vent dans des tunnels éoliens, permettraient une production directe d'électricité;

-la conversion de l'énergie due à la chaleur latente de vaporisation de l'air humide, en énergie mécanique.

-la réalisation de générateur à "vortex" permettant d'accélérer la vitesse du vent et la puissance produite par une éolienne située à la base du générateur.

-l'utilisation de carénages d'éoliennes formant des systèmes convergent ou divergent en vue d'augmenter la vitesse du vent à travers le rotor de l'éolienne carénée.

-l'utilisation de l'effet MAGNUS pour la réalisation d'un système éolien de très grande puissance (200 MW) comportant des cylindres mobiles se déplaçant sur une piste circulaire et entraînant des générateurs électriques.

-l'étude de projets de "barrages éoliens" permettant une concentration des vents à direction dominante.

-l'étude et l'utilisation de pales partiellement souples à profil aérodynamique.

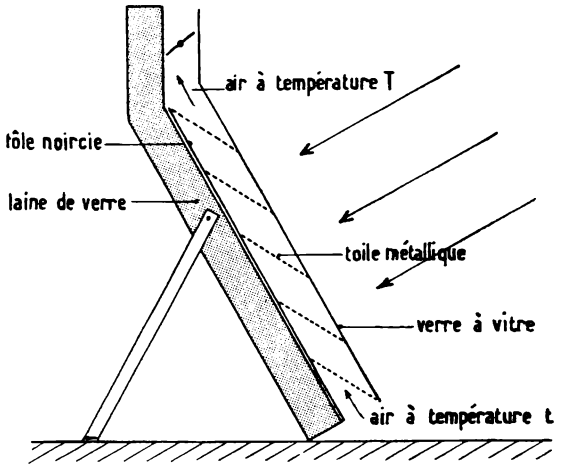
5. Centrale éolienne à capteurs solaires à air. - La fabrication du vent nécessaire pour faire tourner une éolienne est sans doute une idée assez ancienne. Dans un article publié lors du "Colloque International de Montlouis", en Juin 1958, consacré aux applications thermiques de l'énergie solaire, L. BERNARD (1958) décrit un capteur à air dont les premières réalisations dataient déjà de trente ans auparavant. Cette "cheminée solaire", ainsi qu'il l'appelait, est extrêmement simple et permet de créer un courant d'air chaud ascensionnel. Parmi les utilisations envisagées, on pouvait noter : "dans le cas où cette cheminée pourrait être établie sous de très grandes hauteurs, à flanc de falaises ou de montagnes abruptes, la vitesse de l'air à la sortie serait susceptible d'actionner des turbines conçues sur le type des éoliennes".

On peut noter, d'autre part, qu'un ingénieur en aérodynamique, E. NAZARE (1973) avait étudié, vers les années 1960, des projets de centrales aérothermiques utilisant le gradient de température de l'air existant naturellement entre la surface du sol et une certaine altitude, de l'ordre de 600 m dans les projets initiaux. Selon la conception étudiée, une tour ayant la forme d'un venturi vertical avec un convergent-divergent, permettait de générer un mini-cyclone artificiel à auto-amorçage. L'air était aspiré à la base de la tour et le déplacement de l'air, à intérieur de la tour, conduisait à la formation d'un vortex au niveau de l'étranglement du venturi. Selon cet auteur, pour une différence de température entre le sol et le haut de la tour de 15°C, une humidité relative de 15%, le vortex devenait permanent. A partir d'une dimension suffisante de la tour, le fonctionnement devient continu de jour et de nuit. Par suite du gigantisme du projet, aucune réalisation de ce type n'a eu lieu.

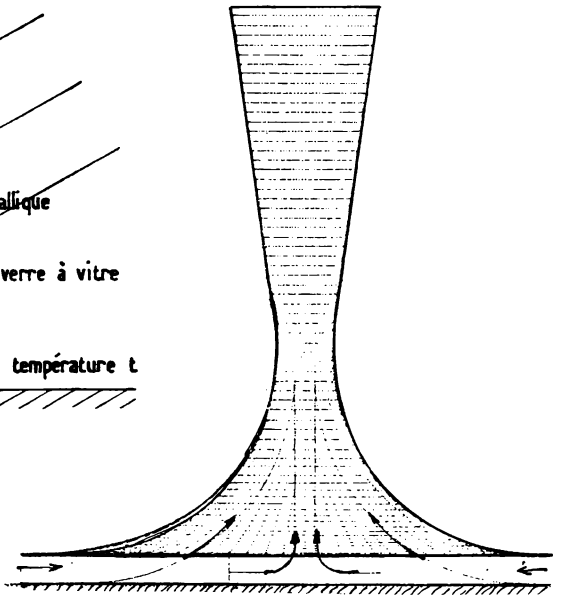
Partant des deux idées décrites ci-dessus, l'utilisation de capteurs solaires à air et la réalisation d'un venturi pour améliorer l'effet de déplacement d'air, l'auteur a étudié, à partir de 1972, l'intérêt du couplage entre des capteurs solaires et un venturi vertical; une maquette utilisant un tel système "fabricant son vent" a été publié en 1977. L'intérêt de l'utilisation de l'effet de serre, pour créer un courant d'air, est de pouvoir réaliser des installations petites dimensions, bien inférieures à celles proposées dans le projet de E. NAZARE.

Un calcul approximatif de la puissance maximale d'une installation de ce type à capteurs solaires à air, peut être réalisé en considérant l'énergie solaire reçue au sol, le rendement possible des capteurs et le rendement théorique de la machine

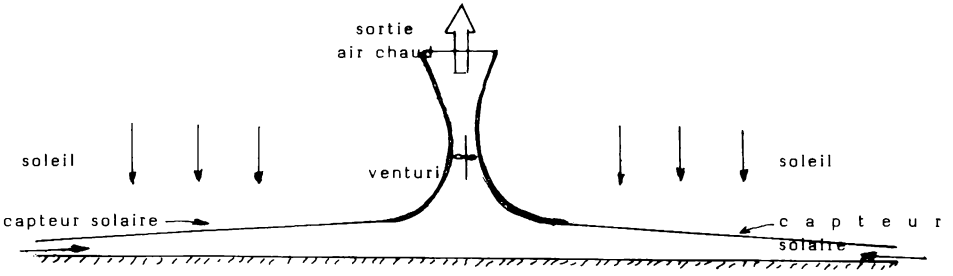
thermique que constitue l'éolienne. Pour une insolation moyenne, sur une surface horizontale, de 600 W/m² et un rendement de capteur de 20% (pour un modèle rustique) on obtient une puissance thermique de 120 W/m². En considérant un air pris à l'extérieur à 20°C et une élévation de température de 30° par le capteur, par exemple, le rendement maximal d'une machine thermique idéale sera d'environ 9%. L'énergie récupérable au niveau de l'arbre de la machine thermique, rapportée au mètre carré de capteur, ne sera alors que de l'ordre de 10 W/m², valeur qui se trouvera divisée par un facteur 2 à 3 dans le cas d'une machine réelle. Par suite, pour une turbine éolienne délivrant, par exemple, une puissance de 1 kW, une surface collectrice de plusieurs centaines de mètres carrés s'avère nécessaire. Pour une réalisation économiquement intéressante, il faudra donc rechercher des terrains bon marché, des structures captatrices simples et peu chères et avoir un site d'implantation bénéficiant d'un excellent ensoleillement.



Cheminée solaire- L. BERNARD (1958)



Tour cyclonique à dépression
E. NAZARE (1973)



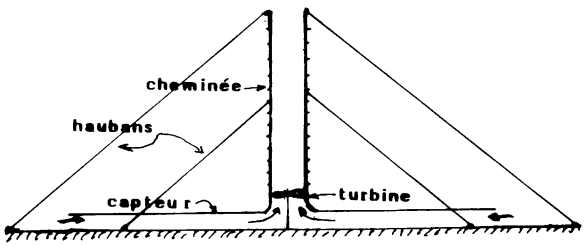
Tour éolienne à capteur solaire à air - J. HLADIK (1977)

Des chercheurs allemands ont également travaillé depuis quelques années sur un modèle analogue, utilisant des capteurs solaires pour faire tourner une éolienne. Leurs études ont abouti à une réalisation récente, implantée en Espagne, et qui est en cours d'essais. L'installation est constituée d'une "cheminée" de 10m de diamètre et de 200 m de hauteur; d'un vaste capteur solaire, situé autour de la cheminée, occupant une surface circulaire de 250 m de diamètre, soit environ 50 000 m². La cheminée a été fabriquée à l'aide de 25 tronçons cylindriques de 8m de hauteur chacun, en tôle mince de 1 mm d'épaisseur, renforcée d'anneaux extérieurs disposés tous les 4 m. L'ensemble est haubanné par 24 câbles.

Le capteur solaire est formé d'une couverture plastique transparente très mince, de 0,1 mm d'épaisseur, tendue sur des câbles métalliques situés à 2m au-dessus du sol. Des clapets de 0,60m de diamètre, situés au milieu de chaque feuille de plastique (6m sur 6m) constituant la couverture, permettent l'évacuation de l'eau en cas de pluie. Différents plastiques sont testés simultanément.

L'éolienne est placée à 10m de haut, à l'extrémité inférieure de la cheminée. C'est une hélice à 4 pales, placée horizontalement, en polyester renforcée de fibres de verre. Les premiers essais ont montré que l'on obtient un vent de 12 m/s en plein soleil à midi. L'éolienne démarre à 4 m/s. Par suite du coefficient d'absorption naturel du sol (qui n'a pas été enduit d'un absorbant noir pour limiter les frais d'installation), une fraction de l'énergie solaire est stockée, ce qui permet un fonctionnement de la centrale en dehors des heures d'ensoleillement et même la nuit si un réglage du débit de l'air admis par des volets limite l'entrée d'air afin de continuer à tourner à puissance réduite.

Ce premier modèle espagnol vise, grâce à sa simplicité et sa légèreté de construction, à devenir le moyen le plus économique de production d'électricité par conversion thermique de l'énergie solaire directe. Cette centrale est équipée pour une puissance maximale de 100 kW mais les pertes par turbulence à l'entrée de la cheminée minimise son rendement. Une compraison de prix avec les centrales solaires à miroirs serait intéressante. La rusticité de l'équipement de la centrale éolienne semble un atout extrêmement favorable à son développement ultérieur.



Centrale éolienne à capteur solaire (R. GEORGEOT -1982)

Réalisation en Espagne - La Mancha -

6. Eoliennes couplées aux pompes à chaleur. - Nous avons vu au chapitre consacré au chauffage éolien que l'utilisation d'une pompe à chaleur couplée sur un système éolien permettait de multiplier l'énergie disponible sur l'arbre de l'aéromoteur par un facteur de l'ordre de 3 ou éventuellement supérieur.

Deux directions de recherches, actuellement en cours au Laboratoire d'Energétique Solaire de l'Université d'Angers, sont poursuivies simultanément :

-d'une part, obtenir un couplage optimum en adaptant au mieux les caractéristiques de puissance de sortie de l'éolienne et d'entrée de la pompe à chaleur. Ce premier point a déjà été examiné lors de l'étude du chauffage éolien.

-d'autre part, améliorer les performances et la fiabilité des pompes à chaleur. Ce dernier point est aussi important que le précédent car certaines installations conduisent à des coefficients de performance très décevants.

Un ensemble de chauffage par pompe à chaleur particulièrement performant a été mis en oeuvre par M. SOULAS (1983), enseignant à l'Université d'Angers. Les résultats expérimentaux conduisent en effet à un coefficient de performance moyen annuel (sur la saison de chauffage), c'est-à-dire un rapport entre l'énergie thermique réellement fournie par le condenseur et celle consommée par le compresseur et la pompe à eau, de l'ordre de **4.** Cette moyenne correspond naturellement à des coefficients de performance bien supérieurs sur de courtes périodes. Ces résultats ont été obtenus en optimisant l'évaporateur et en mettant en oeuvre une technique originale de condenseur permettant une condensation directe du fréon dans des radiateurs spéciaux situés dans chaque pièce à chauffer. Le couplage d'un tel système avec une éolienne conduirait donc à multiplier l'énergie éolienne par des coefficients de l'ordre de quatre.

7. Systèmes augmentant l'énergie éolienne disponible. - L'aéromoteur d'un système éolien constituant l'élément le plus fragile et le plus cher, il est intéressant de rechercher des dispositifs qui peuvent augmenter la puissance de l'hélice pour un diamètre donné. Deux principes de concentration ou d'augmentation de l'énergie peuvent être mis en oeuvre :

-accélérer la vitesse de translation du vent;

-créer un mouvement de rotation de l'air en vue d'en utiliser l'énergie cinétique.

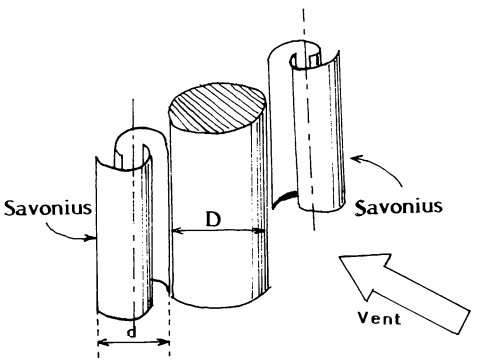
Le premier effet peut être réalisé soit en faisant varier la surface de circulation offerte au vent, c'est l'utilisation d'un venturi; soit en plaçant un obstacle sur le trajet du vent qui, en le contournant, subit une accélération. Le second effet utilise la création d'un vortex lorsque le vent rencontre un système aérodynamique étudié dans ce but.

Accélération linéaire du vent par un obstacle. -Nous avons déjà vu, au chapitre consacré au gisement éolien, qu'un obstacle naturel, une colline en pente douce ,par exemple, provoquait un effet d'accélération du vent au sommet de la colline. Lors

de l'étude de l'effet du vent sur un profil aérodynamique, nous avons également vu qu'un phénomène d'accélération des filets d'air avait lieu sur l'extrados du profil.

J.L. LOTH (1977) a étudié ce type de concentrateur et défini le pouvoir de concentration, R, comme étant le rapport entre l'énergie du vent utilisable par une éolienne après concentration à l'énergie du vent arrivant sur l'obstacle à la vitesse **V**. L'étude d'un cylindre formant obstacle montre que la vitesse maximale est atteinte sur la surface du cylindre, aux extrémités du diamètre per pendiculaire à la direction du vent. Cette vitesse maxima le est égale à 2**V**, mais par suite de l'étendue de la surface collectrice d'une éolienne, la valeur maximale de R sera en général inférieure à 3.

Un système étudié par J.L. LOTH (1977) est constitué de deux rotors Savonius séparés par un cylindre formant concentrateur. Utilisant un cylindre de diamètre D et deux Savonius de diamètre d, l'étude des performances en soufflerie montrent que pour un rapport des surfaces : (D+2d)/2d = 3,45, on obtient un pouvoir de concentration R = 2,35.



Accélération linéaire du vent par un obstacle

Utilisation d'un cylindre avec Savonius. (J.L.LOTH-1977)

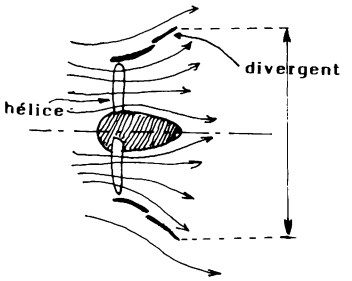
Accélération linéaire par un venturi. - Lorsqu'une masse d'air passe à travers un tube de section variable, on aura, au passage des sections de surface S et S', les vitesses d'air V et V'. Pour un débit massique constant, on a : VS = V'S', d'où:

$$V/V' = S'/S$$

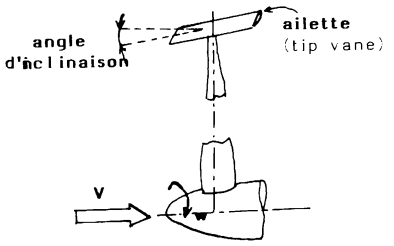
On voit que les vitesses sont inversement proportionnelles aux sections.

Divers systèmes utilisant ce phénomène, dit de venturi, ont été expérimentés. Des dispositifs faisant diverger le flux d'air après le passage à travers l'hélice d'une éolienne permettent d'accroître la puissance d'un aéromoteur. Les systèmes utilisant des divergents semblent plus performants que les convergents. Une technique développée par R.A. OMAN (1977) consiste en un divergent comportant un espace annulaire qui apporte une amélioration par rapport à un divergent simple. Cependant ces systèmes permettent tout au plus d'obtenir un gain de puissance tout au plus comparable à

celui d'une éolienne dont le diamètre serait égal à celui du divergent. Par suite de l'encombrement du divergent qui doit être orienté par rapport à la direction du vent, ces systèmes ne se sont pas développés.



Divergent à plusieurs sections -(R.A.OMAN-1977)



Ailette en bout de pale créant un venturi (VAN HOLTEN -1974) - les ailettes créent un "divergent" par rotation.

Venturi créé par rotation d'ailettes en bout des pales. - Un venturi particulier est celui généré par la rotation d'ailettes placés à l'extrémité de chaque pale d'une hélice. Proposé par T. VAN HOLTEN (1974-1977), ce système, "tipvane induced diffusion", permet de remplacer un divergent de type statique par des segments profilés et convenablement inclinés, en rotation à l'extrémité des pales.

VAN HOLTEN a montré que la rotation des ailettes crée un résultat analogue à celui d'un divergent fixe en augmentant la vitesse de passage du vent à travers le rotor d'une éolienne. Si v est l'augmentation de la vitesse V du vent lors de son passage à travers la surface rotorique de l'éolienne, on peut reprendre la démonstration du théorème de Betz (voir chapitre : Aéromoteur à axe horizontal) en tenant compte de cette augmentation de vitesse. Avec les notations utilisées précédemment, l'expression de la puissance P devient :

$$P = 0{,}5\ d\ S\ [0{,}5(V_1 + V_2) + v]\ [V_1^2 + V^2{}_2]$$

où V_1 et V_2 sont les vitesses du vent loin en aval et en amont de l'éolienne, d est la masse spécifique de l'air et S la surface rotorique. Calculons la dérivée $dP/dV_2 = 0$ et tenant compte du fait que la vitesse v est très inférieure à V_1 ,on obtient pour puissance maximale :

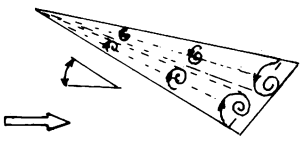
$$P_M = P_o\ [\ 1 + (3/2)v\ /\ V_1\ ]$$

où P_o est la valeur optimale de Betz pour une hélice simple sans système augmentant l'énergie disponible. Une étude expérimentale est actuellement en cours sur des éoliennes munies de ce système à ailettes, à l'Ecole Supérieure Technique de Delft (Hollande).

Concentration d'énergie par vortex. - En mécanique des fluides, on appelle vortex un type de tourbillon dans lequel la vitesse tangentielle des particules du fluide, en chaque point, est inversement proportionnelle à la distance entre ce point et le centre du tourbillon.

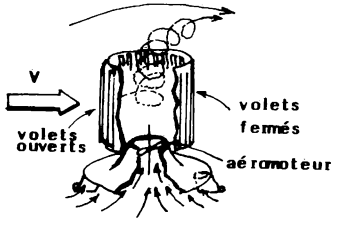
Différentes études ont porté sur les vortex créés par des profils d'ailes placés verticalement et par des plans en forme de triangle (ailes en delta), la pointe dans le sens du vent et ayant un certain angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale.

Un autre type de concentrateur à vortex est celui proposé par J.T. YEN (1977) comportant une tour cylindrique munie de volets mobile et à la base de laquelle se trouvent un convergent et un aéromoteur dont les pales tournent dans un plan horizontal. Les volets sont ouverts dans la direction du vent et fermés dans la direction opposée. Le flux d'air entrant tangentiellement crée un vortex engendrant une dépression importante au-dessus de l'aéromoteur. L'air aspiré à la base du convergent est évacué, en même temps que l'air du vortex, au sommet de la tour. Des facteurs importants d'augmentation de la puissance de l'aéromoteur pourraient, en principe, être obtenus.



Aile en delta génératrice d'un double vortex

Polytechnic Institute-New-York



Tour à volets mobiles créant un vortex

(J.T. YEN-1977)

8. Implantation d'éoliennes "off-shore". - Des Instituts de Recherches de nombreux pays ont étudié la possibilité d'implantation de champs d'éoliennes en mer, sur la plateforme littorale peu profonde bordant les côtes. L'étude de D. LINDLEY et coll. (1980) porte sur l'implantation d'aérogénérateurs à axe horizontal de 10 MW chacun, formant des champs d'éoliennes de 200 machines au large des côtes anglaises. Les profondeurs pour l'implantation varient de 10 à 20m, correspondant à des bandes côtières de plusieurs kilomètres de large.

Le projet suédois "L-180-Poseidon" (O. LJUNGSTROM-1980) propose également l'implantation off-shore de machines de 20 MW. Une distance de 1,25 km est prévu entre chaque machine.

En général, le potentiel éolien au large des côtes est très important et les données des stations météorologiques situées sur les îles mettent bien ce fait en évidence.

CHAPITRE XV
Prospective et conclusion

par **Lucien ROMANI**
Expert éolien auprès de
l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie

Commençons par une anecdote : l'ingénieur en chef des Phares et Balises m'ayant commandé dix aérogénérateurs, un fonctionnaire lui dit, tout ému : "Comment! Vous commandez des éoliennes alors qu'on ignore si cette source d'énergie est rentable." Réponse : "Justement, c'est pour le savoir".

Car il n'échappe pas aux gens de bon sens que le coût d'une source d'énergie nouvelle (ou soit-disant telle) n'est pas déterminable sur le papier.

Malheureusement, il existe des technocrates qui s'imaginent pouvoir classer à chaque instant, grâce à de savants calculs, les sources d'énergies par ordre de "rentabilité".Cette illusion serait peu dangereuse, s'ils ne décidaient ensuite de tout jouer sur l'énergie classée en tête. Cette aberration se double d'une autre, qui consiste à croire, dans une certaine mesure, à la validité des extrapolations à long terme, laquelle est rigoureusement nulle.

Voyons ce qui s'est passé naguère. Vers les années 1950, les "experts" prévoyaient une terrible crise de l'énergie pour une dizaine d'années plus tard. Cette erreur fut bénéfique car elle a incité à financer le développement de toutes sortes de possibilités (énergie nucléaire; énergie des marées, du vent, du soleil; microcentrales au fil de l'eau; magnétohydrodynamique;etc). Mais 10 ans après, au lieu de la crise prévue, le pétrole bon marché coulait à flots.Aussitôt, on organisa le sabordage du charbon, on mit le nucléaire en veilleuse et on arrêta tout le reste.

En particulier, vers 1963, Electricité de France renonça à l'énergie éolienne pour la seule raison (officielle) qu'elle eut coûté 30% de plus que celle provenant du pétrole. (voir P. AILLERET : "Vingt-cinq ans de vie technique et économique d'E.D.F."). Or il est facile de voir que l'incertitude du calcul dépasse de très loin cette marge car il fait intervenir :

-l'intérêt du capital pendant au moins 25 ans;

-le prix du pétrole pendant la même période;

-le coût et la durée des accidents et des pannes, la maintenance,etc. (dans les deux versions comparées).

En outre le calcul n'a pas tenu compte :

-de la pollution;

-de la dépendance vis-à-vis de l'étranger;

-des sorties de devises.

(et j'en passe), toutes choses qui sont à l'avantage de l'énergie éolienne et qui valaient bien les 30% de supplément à supposer que ceux-ci fussent réels.

Il est donc clair que le calculateur peut presque toujours obtenir le résultat qui l'arrange. Et soyez tranquille, il ne s'en prive pas.

La question "tarte à la crème" de la rentabilité des sources est fallacieuse car il faudra bien, tôt ou tard, **mettre en parralèle, sans exception, toutes les sources** à la fois inépuisables et non polluantes, qu'elles soient bon marché ou chères. D'ailleurs, les chères d'aujourd'hui seront bon marché demain et vice versa. C'est pourquoi, je me garderai bien de vous fournir des données économiques qui seraient périmées avant l'impression de mon texte.

Je ferai seulement remarquer que **toutes les sources tendent à coûter le même prix** pour la bonne raison que, si une source est chère, on s'attache à réduire son coût et que, si elle est par trop bon marché, ceux qui en profitent en augmentent le prix impunément.

J'ai énoncé ce "théorème" voici vingt ans. On l'a considéré comme une boutade. Pourtant, si on avait alors lancé toutes les énergies propres, le pétrole coûterait moins cher aujourd'hui, pour la simple raison que la demande irait en décroissant.

Pour terminer, essayons d'esquisser l'avenir de l'énergie éolienne :

-pour les grands réseaux, ce peut être une source d'appoint allant jusqu'à 20% du total. Ce pourcentage est maintenant difficile à atteindre en France, la consommation augmentant encore et quinze années ayant été perdues (mais il est très accessible dans bien d'autres pays dont certains pourraient nous acheter des machine s.)

-à petite échelle, l'énergie éolienne est d'ores et déjà intéressante dans des cas particuliers et dans certaines zones. Nous avons vu l'exemple des Phares et Balises; il en existe bien d'autres : protection cathodique, relais hertziens,îles, bateaux de plaisance ou de compétition, thermopompes, breakwaters,etc.

Au cours du temps, ces cas se multiplieront et les zones favorables s'étendront car :

-le vent ne changera pas tandis que la technologie et les moyens de stockage s'amélioreront,

-les combustibles fossiles coûteront de plus en plus chers et s'épuiseront,

-l'énergie nucléaire se heurtera à des butées redoutables qui commencent à se préciser,

-l'énergie solaire ne concurrencera pas l'énergie éolienne; elles se valoriseront mutuellement.

Je dirait donc pour conclure brièvement :

1. - L'énergie éolienne a un bel avenir.

2. - L'industrie correspondante est plus développée que l'on croît.

3. - La France est, dans ce domaine, le pays le plus avancé, grâce aux efforts de ses chercheurs et de deux de ses grandes administrations : l'Electricité de France et le Service Technique des Phares et Balises.

4. - Les U.S.A. l'auront, comme d'habitude, rattrapée d'ici quelques années.

Enfin, l'énergie éolienne est en train de recevoir un appui bien plus important que les perfectionnements techniques. Je pense à l'actuel développement du **mouvement écologique qui imposera, tôt ou tard, toutes les sources à la fois propres et inépuisables.**

oooooooooooOOOOOOOOOOooooooooooo

Le texte ci-dessus date de 1975. En 8 ans, il n'a pas vieilli. Comme prévu, l'Etranger s'est lancé à fond et nous a distancé (et pas seulement les U.S.A.).

Récemment l'Agence Française pour le Maîtrise de l'Energie (A.F.M.E.) a entrepris de reconquérir le terrain perdu depuis 20 ans. Elle vient de lancer des machines de quelques centaines de kilowatts au moment où la NASA entreprend une machine de 7 000 kW (hélice de 135 m de diamètre !).

Une fois de plus, il faudra beaucoup d'idées pour compenser les carences politiques, plus graves que le manque de pétrole !

Lucien ROMANI
Paris, le 22 Avril 1983.

Bibliographie

AILLERET P. (1946) - "L'énergie éolienne : sa valeur et la prospection des sites". Revue Générale de l'Electricité. Mars 1946.

ARGAND M. (1961) - "Mesure des paramètres caractéristiques de l'énergie éolienne en vue du choix des sites favorables à l'installation d'aéromoteurs". Conférence Sources nouvelles d'énergie organisée par les Nations Unies. Energie Eolienne. Vol.7. ROME.

BAILLON J.C. (1980) - "Problèmes de captation et de couplage mécanique en énergie éolienne". Thèse 3ème cycle. Université Poitiers.

BERTIN (1976-1978) - Rapports D.G.R.S.T. 76-7-1297 et 78-7-2717. D.G.R.S.T. Paris.

BEGUIER L. (1982) - "Méthode de calcul des performances aérodynamiques des éoliennes". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

BERNARD L. (1958) - "Production d'air chaud par le dispositif de la cheminée solaire". Colloque de Montlouis. Juin 1958. Edition C.N.R.S. Paris. 1961.

BETZ A. (1927) - "Die Windmühlen im Lichte neuerer Forschung". Die Naturwissenschafte. Berlin. Nov. 1927. Heft 46.

BETZ A. (1959) - "Einfuhrung in die Theorie der Stromungsmaschinen". Windrader. Karlsruhe. Verlag G. Braun.

BONNEFILLE R. (1975) - "Les réalisations d'E.D.F. concernant l'énergie éolienne". La Houille Blanche. N° 1. 1975.

BONNET & PERROUD. (1982) - "Les essais d'aérogénérateurs au C.E.A. : le CESTAT à Bordeaux, le site à fort givrage de Chamrousse". Séminaire éolien A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

BORDREUIL C.; BARBIA A. & COMTE P. (1973) - "Vent de Nord-Ouest et "Mistral" à Marseille de 1882 à 1970. Essai statistique". Monographie n° 88. Météorologie Nationale. Paris.

BREMONT M. (1982) - "Le développement d'une industrie française d'éoliennes et d'aérogénérateurs". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

CHEVALIER D. & HELMER J.M. (1982) - "Calcul dynamique des aérogénérateurs". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

CLAUSIN J. (1979) - "Le chauffage éolien". Cahiers Techniques du Bâtiment. Le Moniteur. N° 23.Juin 1979. Paris.

COMOLET R. (1982) - "Eolienne Darrieus : théorie et performances". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

COMOLET R.; HARAJLI I.; MERCIER DES ROCHETTES P. & YEZNASNI A. (1982). "Sur l'épanouissement du flux à la traversée d'une éolienne Darrieus : théorie et expérience". C.R. Acad. Sc. 28.06.1982.

COTTON DE BENNETOT M. (1981) - "Convertisseur d'énergie cinétique de rotation en chaleur par génération de courants de Foucault". Demande de Brevet français le 16.10.1981. N° 81 19468. I.N.P.I. Paris.

COUDEVILLE H. & M. DE BENNETOT. (1982) - "Conversion énergie mécanique-chaleur par courants de Foucault; optimisation du rendement d'une éolienne". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

CROMACK D.E.; Mc GOWAN J.G. & HERONEMUS W.E. (1980) - "The status of wind-power research and development for space and water heating in the United States" 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

CUNTY G. (1979) - "Eoliennes et Aérogénérateurs". Ed. EDISUD. Aix-en-Provence.

CUNTY G. (1982) - "Les éoliennes et aérogénérateurs en site isolé". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

DARCHEN J. & DE BLOCH A. (1974) - "Les vents sur les côtes de la France métropolitaine". Fascicules 1 & 2. Monographie n° 62. Météorologie Nationale. Paris.

DARKAZALLI G. & Mc GOWAN J.G. (1978) - "Analytical Performance and Economic Evaluation of Residential Wind or Wind and Solar Powered Heating Systems". Solar Energy. Vol. 21. pp. 415-421.

DE LAGARDE J.M. (1980) - "Evolution of the Flexible Blade Concept-Vertical Axis Windmill". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield.England.

DIVONE L.V. (1980) - "The Current Perspective on Wind Power Based on Recent U.S. Results". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. pp.1-16. Ed. BHRA. Cranfield. England.

DIVONE L.V. (1978) - "Wind Energy Developments in the United States" 2nd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

DOWNEY W.T. & LITTLE A.D. (1980) - "On the Costs and Benefits of Sitting a Wind Turbine in the Mountains of New Hampshire". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

DRIVIERE J. (1980) - "Etude expérimentale d'une éolienne type Darrieus couplée à un convertisseur oléothermique". 17ème Colloque d'Aérodynamique Appliquée. Grenoble. 1980.

DUCHENE-MARULLAZ Ph. (1975) - "Vent et température au voisinage d'une ville". EN.CLI.75.4. Publication C.S.T.B. Nantes.

DUCHENE-MARULLAZ Ph. (1977) - "Distributions statistiques et cartographie des vitesses moyennes de vent en France- Applications à l'énergie éolienne". Note C.S.T.B. Nantes. EN-CLI. 77.1.

DUCHENE-MARULLAZ Ph. (1978) - "Echelle de turbulence et spectre de la vitesse du vent en zone urbaine". Cahiers du C.S.T.B. N° 1496. Avril 1978.

DUCHENE-MARULLAZ Ph. (1981) - "Les données climatologiques sur les sites des opérations expérimentales". Note C.S.T.B. Nantes. EN.CLI. 81.2.

DUCHENE-MARULLAZ Ph. (1982) - "Description des propriétés de la couche limite atmosphérique-Vents extrêmes". Note C.S.T.B. Nantes. EN-CLI. 82.6.L.

DUMON R. (1980) - "Economies et conversions d'énergie". Ed. Masson. 1980. Paris.

DURAND-RAUCHER Y. (1982) - "La contribution du Service des Phares et Balises dans le domaine de l'énergie éolienne". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

ELLIOT W.P. (1958) - "The Growth of the Atmospheric Internal Boundary Layer". Trans. Amer. Geophys.Union. n° 39. pp. 1048-1054.

FANUCCI J.R. (1975) - "An Investigation of Rotation Induced Stresses of Straight and Curved Vertical Axis Wind Turbine". Sandia Laboratories. SAND.74.03.79.

FRANKLIN INSTITUTE PRESS (1980) - "Energie éolienne" Editions S.C.M. Paris.

FRENKIEL J. (1962) - "Wind profiles over hills in relation to wind power utilization". Quart. J. Roy.Meteorol. Soc. N° 88.pp.156-169.

FROST W. & LONG B. (1977) - "Engineering Handbook on the atmospheric environmental guidelines for use in wind turbine generator development". Report on NASA contract. NAS.8.32118.

FROST W & SHIEH C.F. (1981) - "Guidelines for siting WECS relative to small scale terrain features". FWG Associates Inc. Tullahoma.USA.

GAL G. (1979) - Brevet français n° 2 459 380 déposé le 19.06.1979.

GALANIS N. & DELISLE A. (1973) - "Performance evaluation of wind driven heating systems". Proceedings 8th Intersociety Energy conversion engineering conference. Philadelphia. pp. 376-381.

GEORGEOT R. (1982) - "Le moulin à vent solaire". Sciences et Vie. n° 782. pp.100.101.

GLAUERT H. (1959) - "The elements of airfoil and airscrew theory". Cambridge University Press. England. 1959.

GOETHALS R. (1980) - "L'énergie éolienne". La Recherche. Vol.11. N° 109. Mars 1980. pp. 262-271.

GOETHALS R. (1980) - "Cours d'énergie éolienne". Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique. Poitiers.

GOETHALS R. & LEBLANC L. (1982) - "Effet de rafale sur éoliennes en soufflerie". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov 1982.

GOWAN Mc J.G.; DARKAZALLI G. & HERONEMUS W. (1975) - "Wind and solar thermal combination for space heating". Proc. 10th Inters. Energy Conv. Eng. Conference. Newark.Del. 1975. pp. 974-980.

GUNKEL W.W.; FURRY R.B.; LACEY D.R.; NEYELOFF S. & PORTER T.G. (1979) "Development of a wind-powered water heating system for dayry application". USDA Wind Workshop Proc. May 1979. Iowa State University. Ames.Iowa. NTI CONF. 7905/109. pp. 124-157.

GUNKEL W.W. & LACEY D.R. (1981) - "Wind powered direct water heating. Applications in agriculture". Proc. of the small wind turbine systems. May 1981. Boulder.

GUNKEL W.W.;LACEY D.R. & NEYELOFF S. (1980) - "A wind driven direct water heating system". ASAE National Energy Symposium. Agricultural Energy. Vol.1. Solar Energy and Livestock Production. Ed. American Society of Agricultural Engineers. St Joseph. MI. USA.

GUYOT G. (1972) - "Etude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente". Thèse Docteur-Ingénieur. Université ParisVI.

HENNESSEY J.P. (1977) - "Some aspects of wind power statistics". J. of Applied Meteorol. Vol 16. n°2. pp.119-128.

HLADIK J. (1977) - "Les accumulateurs électriques". Presses Universitaires de France. Coll. "Que Sais-Je?". Paris.

HLADIK J. (1977) - "Eoliennes fabricant leur vent". Le Courrier Ouest. 27.03.1977.

HLADIK J. (1981) - "Energie éolienne dans la Région des Pays de la Loire-Applications pratiques". Rapport Laboratoire Energétique Solaire. Université Angers. Convent. COMES. Paris. 1981.

HLADIK J. & coll. (1982) - "Energies renouvelables dans la Région des Pays de la Loire". Ed. CEDRE. Angers. 1982.

HLADIK J.; HERBRETEAU D. & ZAHM C. (1982) - "L'énergie éolienne en Maine-et-Loire". Bull. Soc. Et. Scientif. Anjou.N.S. Tome XI. 1982. pp. 79-87.

HLADIK J. (1982) - "Le chauffage éolien des serres". Colloque Intern. Université Perpignan. Mai 1982. Perpignan.

HLADIK J. (1983) - "Chauffage éolien". Cahiers Techn. Bâtim. N°54. Mai 1983. Ed. Le Moniteur. Paris.

HLADIK J.; SOULAS M. & ZAHM C. (1982) - "Utilisation de l'énergie éolienne pour le chauffage des bâtiments". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

HOLME O. (1976) - "A contribution to the aerodynamic theory of the vertical-axis wind turbine". Proc. 1st Intern. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

INSTITUT DEVELOPPEMENT RESSOURCES RENOUVELABLES (1979) -"Estimation des disponibilités locales en énergie éolienne à partir des observations du service météorologique métropolitain" Mission Intermin. Aménagement Littoral Languedoc-Roussillon. Corbères les Cabanes. 66130.

JACKSON P.S. & HUNT J.C.R. (1975) - "Turbulent wind-flow over a low hill". Quart. J. Roy.Meteorol. Soc. N°101.pp.929-955.

JANSEN S.A. & BJERREGAARD E.T.D. (1980) - "Test performed on the 2 MW Tvind WECS". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield;England.

JUSTUS C.G. (1980) - "Vent et performances des éoliennes". Traduction J.L. PLAZY. Ed. SCM. Pa ris. 1980.

JUSTUS C.G. & MIKHAIL A.S. (1976) - "Height variation of wind speed and wind distribution statistics". Geophys. Res. Letters.N°3. pp.261-264.

KAMINSKY F.C. (1976) - "Four probability densities (log-normale, gamma, Weibull and Rayleigh) and their application to modeling average hourly wind speed". ERDA Contract N° ERDA(49-18) 2365. University of Massachusetts.

LAPIN M. (1975) - "Theoretical performance of vertical-axis wind turbine". ASME. Pap. N°75. WA. Ene.1.

LEBLANC R. (1982) - Journée d'étude A.F.E.D.E.S. sur l'énergie éolienne. 29.04.1982.

LE CHAPELLIER P. (1981) - "Le vent. Les éoliennes et l'habitat".Eyrolles.1981.Paris.

LECLERE P. (1982) - "Résumé des principaux points de l'expérimentation d'Ouessant". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov.1982.

LECLERE P. (1982) - "Etude des possibilités de couplage de petits ou grands aérogénérateurs sur un réseau". Séminaire éolien A.F.M.E. Vabonne. Nov.1982.

LE GOFF P. (1980) - "Energétique industrielle. Analyse économique et optimisation des procédés". Tome 2. Technique et Documentation. Paris. 1980.

LE GOURIERES D. (1980) - "Energie éolienne". Ed. Eyrolles. Paris. 1980.

LINDLEY D. & SIMPSON P.B. (1980) - "Assessment of offshore sitting of wind turbine generators". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems.pp. 17-42. Ed. BHRA. Cranfield.

LJUNGSTROM O. (1980) - "L-180.Poseidon. A new system concept in vertical axis wind turbine technology". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

LOTH J.L. (1977) - "WVU wind energy concentrators". 1st. Int. Symp. Wind Energy Systems.Ed. BHRA. Cranfield. England.

MAC GOWAN J.G. & WENDELGLASS P.F. (1980) - "Feasability study of wind-powered systems for dairy farms". J. of Energy. Vol.5. N°3. pp. 164-171.

MAC GUIGAN D. (1978) - "The Wind for Home Energy". Garden Way Publishing.USA.

MALBRANCHE Ph. (1982) - "Le dessalement et la production de glace". Séminaire éolien A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

MANWELL J.F. & MAC GOWAN J.G. (1981) - "A design procedure of wind powered heating systems". Solar Energy. Vol. 26. pp.437-445.

MARIE J.P. (1982) - "Introduction à un débat sur les critères d'intégration de l'énergie éolienne dans son utilisation pour l'habitat". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne.

MATZEN R. (1978) - "Wind energy-Heat generation". 2nd Int. Symp. Wind Energy Systems. Pap.H2. Ed. BHRA. Cranfield. England.

MEIJER DREES H. (1978) - "The cycloturbine and its potentiel for broad applications" 2nd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

MUSGROVE P.J. (1976) - "The variable geometry vertical axis windmill". 1st Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

MORIYA & TOMASAWA (1961) - "Wind turbines in Japan". Conf. Sources nouvelles d'énergie. Nations Unies. Rome. Vol. 7. 1961.

MERCADIER Y. (1978) - "Calculation of the geometry and performance of a high-speed wind rotor". Wind Engineering. Vol.2. N°1. pp. 25-36.

NAZARE E. (1973) - "L'énergie éolienne,solution de relève?". Industries et Techniques. N°228. Avril 1973.

NEYELOFF S. & GUNKEL W.W. (1978) - "Design of a direct wind energy converter to heat water by agitation in a closed tank". Wind Techn. J. Vol. 2. N°1&2.

OMAN R.A. (1977) - "Fluid dynamics of duffuser augmented wind turbines". Proc. IE.C.E.C. 12th Washington D.C. Pap.N° 7792 74.

PARASCHIVOIU I. (1981) - "Aerodynamics loads and rotor performance for the Darrieus wind turbine". 2nd AIAA Terrestrial Energy Systems Conference. Colorado Springs.USA.

PLAZY J.L. (1982) - "Les stations de mesure de potentiel éolien". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

PLATE E. (1982) - "Engineering Meteorology". Ed. Elsevier. Amsterdam.1982.

POGGI A. (1977) - "Introduction à la microclimatologie. Transferts d'énergie atmosphère sol". Ed. MASSON. Paris.

READ S. & SHARP D.J. (1980) - "An extended multiple streamtube theory for vertical axis wind turbine".Proc. 2nd B.W.E.A. Wind Energy Workshop. Cranfield. Avril 1980. Multiscience.

ROGER R. (1979) - "Construire une éolienne". Ed. de la Lanterne. Lure.70200.

ROMANI L. (1948) - "Groupe éolienne-pompe à chaleur". Brevet d'invention français N° 1 010 982 demandé le 16.11.1948 .

ROMANI L. (1954) - "Perfectionnements aux turbines aériennes ou hydrauliques". Brevet d'invention français N° 1 098 995 demandé le 1.02.1954.

ROMANI L. (1976) - "Le vent, source d'énergie". Conférence Université Montpellier.1976.

ROMANI L. (1982) - "Les essais en soufflerie : intérêts et limitations" Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov 1982.

ROLLAND Jr.M.G.; CROMACK D.E. & HERONEMUS W.E. (1979) - "Performance matching of hydraulic energy converters and wind turbines for heating purposes". Technical Report. University of Massachusetts. UM.WF.TR.79.8.

SACRE C. (1977) - "Influence d'un obstacle topographique sur l'écoulement de l'air dans les basses couches de l'atmosphère". Thèse Doctorat Etat. Université Paris VI. 1977.

SACRE C. (1978) - "Influence de la topographie sur l'énergie éolienne". Cahiers C.S.T.B. N° 1496. (Avril 1978).

SACRE C. (1982) - "Etude des sites pour l'implantation d'une éolienne". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

SAINT LOUVENT B. de. (1982) - "Influence de la structure du vent sur le comportement des éoliennes". Séminaire éoliene. A.F.M.E. Valbonne. Nov. 1982.

SCHNEIDER J. (1979) - "Energie éolienne. Construisez vous-même votre éolienne". Ed. du Cataclysme. Chambéry.

SEXTON J.H. (1978) - "Wind turbine design performance and economic analysis". University of Massachusetts. Technical Report. UM.WF.TR.78.3. May 1978.

SORENSEN B. (1981) - "Turning to the wind". American Scientist. Vol. 69. pp.500/508.

SOULAS M. (1980) - "Le chauffage thermodynamique". Editions Techniques et Scientifiques Françaises. Paris. 1980.

SOULAS M. (1983) - "Chauffage de l'eau par énergie solaire à travers le sol. Application à la mise en oeuvre d'une pompe à chaleur à condensation directe". Thèse Docteur-Ingénieur. Universités Perpigna et Angers.1983.

SOULAS M.; HLADIK J.; LE PALEC G. & DAGUENET M. (1983) - "Etude du chauffage de l'eau par énergie solaire à travers le sol". Entropie. N° 109. pp.32-35. Fév.1983.

STRICKLAND J.M. (1976) - "A performance prediction model for the Darrieus turbine". 1st Intern. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

STRICKLAND J.M. (1980) - "A vortex theory of the Darrieus turbine. An analytical and experimental data". Sandia Laboratories. SAND. 79.70.058.

TEMPLIN R.J. (1974) - "Aerodynamic performance theory for the NRC vertical axis wind turbine". Rapport LTR LA 160. Conseil National de Recherches du Canada. Ottawa. Juin 1974.

TODD C.J. (1977) - "Cost effective electrical power generation from the wind". Proc. Symp. Amer. Sec. Intern.Solar Energy Society. Orlando.Fla.June.

VADOT L. (1959) - "La production d'énergie par éoliennes. Problèmes économiques". La Houille Blanche. N° 1.

VAN HOLTEN T. (1974) - "Performance analysis of a windmill with increased power output due to tipvane induced diffusion of the airstream". Memo M.224. Techn.Hoge.Delft.

VAN HOLTEN T. (1977) - "Windmills with diffuser effect induced by small tipvanes". Proc. Int. Symp. Energy Syst. Ed. BHRA . England.

VAN HOLTEN T. (1978) - "Tipvane research at the Delft University of Technology". 2nd Int. Symp. Wind Energy Systems.Ed. BHRA. Cranfield. England.

VAN SANT J.H. & MAC CONNEL R.D. (1978) - "Results of preliminary evaluation tests of a 230 kW vertical axis wind turbine" 2nd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

VAS J.E. & SOUTH P. (1980) - "A review of the SERI wind energy innovative systems program". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. Ed. BHRA. Cranfield. England.

WEBER W. (1980) - "The conceptual design of the high speed ratio wind rotor". 3rd Int. Symp. Wind Energy Systems. pp. 239-251. Ed. BHRA. Cranfield.England.

WOLF J. & PLAZY J.L. (1982) - "Le centre national d'essais éoliens de Lannion: objectifs et moyens". Séminaire éolien. A.F.M.E. Valbonne. NOv. 1982.

YEN J.T. (1977) - "Tornado-type wind energy system : basic consideration". 1st Int. Symp. Wind Energy System. Ed. BHRA. Cranfield. England.

Index alphabétique

Accélération du vent, 40,41,196,200,201
Accumulateur, 34,105,115,145,146,147
Aérodynamique, 83,87
- , bruit, 174
- , coefficient, 58
- , décrochage, 72,75,124,162
- , force, 74,192
- , frein, 78,91,92,97,151
- , profil, 54,55,57,58,59,70,84,87,192,201
- , rendement, 59,60,62,63
Aéroturbine, 26,28,30,69,78,81,109,111 114,125,148
Aérowatt, 21,26,30,69,75,79,101,102 106,107,109,111,122,123,124,148, 151,152,157,188,190
A.F.M.E., 17,18,19,20,23,109,204,206
Ailes à planches, 55,56
Alcoa,160
Allemagne Fédérale, 14,23,105,159,164
Alsthom-Atlantique, 109
Alternateur, 86,97,113, 124,125,137,138 148,151,154,158
Amortissement (financier), 16,140,150
Amortisseur hydraulique, 91
Anémomètre, 32,33,36,40,44
- , à coupelles, 33,44,83
- , à hélice, 33
- , intégrateur, 153
- , totalisateur, 33
Angers, 34,36,38,107,118,119,120,121,131
Angle
- d'attaque, 54,195
- de calage, 60,62,63,66,68,71,72,73, 75,76,77,125
- de décrochage, 58
- d'incidence, 54,55,57,58,59,62,123
Aquaculture, 105
Arnbak, 84
Asynchrone, 122,126,134,157,168
Aubes, 84,85,86,87,88,94,96
Auto-producteur, 179,181
Axe
- de lacet, 195
- d'orientation, 79
- d'oscillation, 195
- de pale, 60,195
- de rotation, 55,56,60,62,76,79,93,161,195

Balises, 75,86,108,148,151,152,204
Bakélite, 70
Battement, 195,196
Batteries, 34,86,146,147,175
Bénéfice actualisé, 27
Bertin, 97,116
Best-Romani, 79,111,135,154,155, 156,158
Betz,
- , limite de, 50,51,64,65,153,155,157,175
- , théorie de, 63,202
Bielle-manivelle, 184,186,187
Bord d'attaque, 54,55,57,69
Bord de fuite, 54,55,57
Brest,52
Bretagne, 21,22,23,153
Brevet européen, 98,100
Brevet d'invention, 94,98,99,100,103,135
Bruit (éolien), 174
Bruno, 109
Budget éolien, 18,20,21,159

Calage, 60,68,73,77,111,123,124,137,148, 149,151,157,161,162,166
Caloporteur, 121,122,127,130,131,132,142
Calories, 132,135,140
Canada, 19,88,90,91,117,151,161
Capteurs solaires, 122,139,141,197,198,199
Carénage,196
Carré(éolienne), 74,153
Catamaran, 193
C.E.A., 21, 152
Centrale hydraulique, 29
Centrale, 22,91,177,180,197,199
Chaleur latente, 196
Chauffage, 116,117,118,120,121,122,132, 138,141,146
- électrique, 28,122,138,148
- éolien, 90,103,105,108,115,116,117,119, 120,121,124,126,132,136,138,139,140,141, 142,143,144
- solaire, 116, 121
- thermodynamique, 132
Collines, 40,41
Comes, 116,117,138
Compresseur, 109,112,132,135,146,200
- centrifuge, 133
- ouvert, 133
- à piston, 133
Condenseur, 132,135,200
Convergent, 196,197,201,203
Conversion, 19,83,103,109,110,111,113, 121,127,128,130,131
- électrique, 141,145

Conversion,
- mécanothermique, 138,141,142
- thermodynamique, 131
Convertisseur,
- d'angle, 34
- à courants de Foucault, 130,131
- hydraulique, 127,128
- mécanothermique, 90,116,134,139,140, 141
corde (d'un profil), 57,60,72,91,93,95,123
Coupelles (anémomètre à), 33
Couplage, 133,134,140,189,200
- mécanique, 135,184,186,187,189,190
- au réseau, 153,156,158,159,167
- de rotors, 86
Couple,
- de démarrage, 75,85,123,188
- moteur, 55,67,71,77,85,87,94,114,124, 183,187
- d'orientation, 79
- résistant, 131,
Coupleur hydrocinétique, 111,112,114, 127,128,129,130,131,139,140,141,142
C.S.T.B., 20,43,95,116,143
Cyclonique, 118
Cycloturbine, 94

D.A.F., 90,91,151,161
Danemark, 21,23,26,29,82,95,96,105,107, 108,128,136,138,150,159,161,162,167,181
Darrieus, 19,83,84,87,88,89,90,91,92, 93,94,96,97,103,104
Décharge électrique,147
Décrochage aérodynamique, 72,75,113, 124,162
Déduction fiscale, 143,144
Degrés-jours, 119
Démultiplicateur, 184,185,186
Densité de l'air, 38,183
Dépression, 55,192,193
Dérive, 75,78,79,86,94,127,158
Dessalement, 152
Devises (étrangères), 15,178,205
Diamètre,
- d'une éolienne, 90,91,95,110,126,149, 150,152,153,155,159,161,164,165,177, 182,183,184,185,186,189
- d'un pylône, 91,160,161,165
Diésel, 91,179
Distribution,
- des vitesses du vent, 36,37,45,46,49,51
- de Weibull, 37,46,47,143
Drapeau (mise en), 72,73,74,104,162
Dunlite, 28,29,107
Duranteau, 109,149

Echangeur, 139,140,141
Economies, 15,22,143,144,193
Ecran (éolienne à), 84,86,87
E.D.F, 18,20,76,79,80,146,153,155,156 158,167,168,177,179,180,181,204,206
Elektro, 26,28,29,30,81,84,86,107,150
Elingues,81
Empennage, 71,78,79
Electricité,
- , production d', 22,77,79,97,105,115, 121,122,124,136,137,145,153,165,168,171
- , transport d', 80
Electrique,
- , courants, 145
- , intensité, 147
- , lampes, 151
réseau, 23,91,105,145,159,179,180
- ,résistances, 121,122,141
- , tension, 147,148,168,179,180
Enag, 26,28,30,74,77,109,110,124,147,148
Energie,
- d'appoint, 48
- cinétique (du vent), 38,48,49,64, 65,66,103,107,200
- éolienne, 29,32,34,38,39,40,50,51, 118,119,120,121,142,153,171
- éolienne annuelle,, 38,39,46,48,49, 52,53,115,154
iso-valeur de l'énergie, 50
- "noble", 15
- primaire, 24,99
- , prix de l', 24,26,27,28,30
- réactive, 180
- renouvelable, 13,15,102,144,181
- , renchérissement de l', 24
- solaire, 15,116,120,121,139,141,197,205
Entretoises, 91,92
Environnement, 15,16,43,44,126,173
Eole 80, 89, 126,149
Eolec, 80,149
Eolienne,
- à axe horizontal, 54,67,78,87,135,137
- à axe vertical, 83,84,87,91,103,116, 128,135,138,139,151,161,193
- bipale, 65,75,85,89,90,148,164
- de chauffage, 115,122,124,144
- à écran, 84,86,87
- lente, 17,68,79
- multipale, 77,78,85,110,150,182, 183,184,186
- à pale unique, 104
- de pompage, 182,183,185,186,187
rapides, 67,79,182,186,187
- à traînée, 84,85
- tripale, 66,85,86,93,110,124,125,126 137,141,148,161,162
Erosion,124
Etats-Unis, voir U.S.A.
Evaporateur, 200
Excentrique,96
Exhaure,182,185
Expert éolien, 18,204

Extrados, 55,57,58

Fabricant (d'éoliennes), 109,113,122,167
Facteur de conversion, 26,28,48,52,65, 66,67,84,86,87,88,94,96,110,111,125,126, 138,155,162,164,182,183,186
Facteur d'échelle,37,46,47
Facteur de forme, 37,46,47
Fatigue,18,69,83,126,158,177
Ferme éolienne, 21,22,23
Fiabilité, 18,20,83,86,128,130,167, 186,200
Fiat, 71,160
Fibres de verre, 70,150,160,162,199
Filière, 69,70
Finesse (d'un profil), 59,62,71,72,75
Flettner,192
Fonction Gamma, 51
Fondations (d'un pylône), 28,80,82,137,176
Forage, 185,189
Force centrifuge, 71,72,73,74,76,78, 86,91,97,123
Foucault (courants de), 109,122,130,131
France, 15,20,21,24,26,43,44,48,98,99,100 127,138,144,149,159,174,205,206
Fréon, 122,132,200
Frein, 68,73,77,83,91,92,109,126,155,166
Fréquences, distribution de, 45,46,49,50
Fréquences propres, 81
Fuel, 24,25,178

Génératrice (électrique), 73,77,83,90,94, 101,104,109,114,122,124,134,137,157, 161,164,166,175,176,178,194
Giromill,95
Girouette, 32,34,80,195
Gisement éolien, 13,15,21,22,43,123,200
Göttingen, 57,65,67
Gradient,
- de température, 197
- vertical (de vitesse), 40,177,195
Grande-Bretagne, 23,93,160
Gravitation, 195
Groupe électrogène, 156,168
Growian, 14,68,114,159,164,165,166,173
Guinard, 111,188,190,191

Haubans, 82,90,91,92,93,141,187,199
Hauteur manométrique totale(HMT), 183,184,185,186,188
Hélice, 68,75,76,79,102,104,114,123, 125,148,151,154,157,160,175
Histogramme,
- des vitesses, 36,38,107,108
- de l'énergie, 38,39
Hollande, voir Pays-Bas
Humblot, 26,28,109,148,185
Hydraulique (système), 129,133,137,168,
Hydro-Québec,91

Ile, 13,18,19,105,118,152,203
- Belle-, 118,
- de Gotland, 160
- de la Madeleine, 19,90,91,92,105,161
- d'Ouessant, 20,77,105,153,156, 157,175,176
- de Vancouver, 90
- d'Yeu, 36,115,118
Indépendance énergétique, 15,17
Industrie éolienne, 17,159
INSEE,24
Instationnaire, 18,97
Interférences radio-électriques,174
Intrados, 55,57
Inventions, 98
Investissement, 22,24,27,28,121,122,135 143,144,171,175,176,177,178
Italie, 71,160

Joule, 113

Kevlar, 70
Kilowatt installé, 29
Kilowatt nominal, 29,30
Kilowatt-heure (prix du), 29,30,153,168

Lacet (mouvement de), 101,103,104,195
Lamellé-collé, 70,148,149,150
Lannion (Centre d'Essais de), 19,20,106, 148,167
Lübing, 186,187

Magnus, 192,193,197
Maintenance, 15,25,27,83,126,127 135,143,204
Mandrin (de pale), 101,104
Marché éolien, 21
Masse volumique, 49,58,128,202
Matériaux composites, 70
Messerschmitt, 101,102
Météorologie Nationale, 33,34,35,43,44
Météorologiques,
- , données, 34,35,36,38,44,120,184
- , stations, 44,47,118,140,203
Micro-centrale, 168,204
Micro-réseau,179
Moulin à vent, 16,22,55,103,104
Moulin persan, 86
Moulinet (anémomètre à), 33
Multiplicateur, 73,90,91,94,97,110,111, 114,124,126,129,133,135,137,140,149,154 157,163,166,174,175,176,189
Multiplication, 112,113,114,148,164

NACA, 57,59,66,67,71,72,74,89,91, 95,110,127,161,162,
Nacelle, 79,135,137,140,156,162,163, 164,165,166,176
NASA, 160,206

Neyrpic, 79,154,155
Nibe, 159,162,163,164
Nuisances, 172,177

Off-shore (implantation), 203
Onduleur, 145,146,175
Orientation,
- , auto-, 79,81,148,154,155,158,161
- par dérive, 79,127,158
- , système d', 68,78,102,103,124,166,195
- , vitesse d', 124

Pales, 14,18,22,26,54,56,57,60,83,86 101,123,166,179
- en alliage, 69,70,72,74,75,86,90,124, 125,127,148149,152
- en bois, 69,124,152
- doubles, 194
- , fabrication de, 68,101
- , fréquences de, 138
- en lamellé-collé, 148,149
- en matériaux composites, 70,71,93,97, 101,104,126,152,158,162,164,195
- , nombre de, 67,89,95,153
- orientables, 96
- , pas des, 101,104
- , pied de, 73,75,102,103,158,164
- , rotation des, 85
- , rupture de, 158
- souples, 86,197
- , surface des, 65,66,68
- , translation des, 73
- , vibrations des, 155
Panémone, 84,85,86,87
Paramètre de fonctionnement, 63,67,68, 85,87,110,111,162,164,182
Pays-Bas, 21,23,160,163
Perpignan, 48,52,120
Phare, 45,75,148,151,152,204
Photopile, 149,151,171
Pile à combustible, 105
Plan Construction, 116,138
Plan de rotation, 60,74,77,78,79
Plateforme continentale, 194
Plénitude (coefficient de), 68
Pollution, 22,205
Pompage, 105,109,121,179,182,184,189
Pompe,
- centrifuge, 111,112,133,187,188,190
- à chaleur, 122,131,132,133,134,139,200
- à membrane, 185,186
- à piston, 112,183,184,186,187
Portance, 54,55,58,59,60,83,84,87, 94,182,195
Poseidon-L-180, 193,194,203
Potentiel éolien, 20,23,116,159,160
Potentiel thermique, 132
Précession, 195
Prix des éoliennes, 26
Proengin, 85,86,109,149
Profil, 54,55,69,87,88,161,203
Profilé, 69,70,75
Programmes éoliens, 13,17,159
Puissance,
- , caractéristique de, 111,112,113, 127,128,133,187,188
- , courbe de, 51,96,106,108,113,124, 154,157,164
- du vent, 33,38,49,66
- d'une éolienne, 15,23,26,29,30,31,51, 77,90,92,96,107,110,120,128?134,138, 155,170,174,183
- motrice, 60,61,63,64,65
- moyenne, 49,174,175
- nominale, 14,26,29,30,72,74,90,106,113 123,127,148,153,154,155,161
- surfacique, 30
Pylône,
- auto-porteur, 81
- haubanné, 81,82
- anémométrique, 43,44
Pylône, 16,22,26,28,69,72,79,80,81,96, 97,127,135,148,150,159,160,176,189
Pyranomètre,34

Quantité de mouvement, 88
Québec, 86,87,92,105

Rafale, 32,69,93,155
Rayonnement solaire,13
Refoulement (hauteur de), 183,184
Réfrigérateur, 145,146
Régulation, 18,68,69,71,73,75,76,77,78, 86,91,93,103,104,106,122,124, 149,151, 161,162,176,186
Rendement, 30,59,60,132,146,156,162, 167,170,175,188,189
Rentabilité, 106,115,116,168,171,179,205
Renvoi d'angle, 83,189
Réseau,
- électrique, 23,91,105,115,137,145 153,158,159,167,168,179,180
- hertzien,174
Résine époxy, 97,126,137,152,160
Résorcine,124
Ressort, 73,76,77,123
R.F.A., voir Allemagne Fédérale
RISØ, 96,150,167
Rose des vents, 36
Rotor, 77,79,82,88,91,96,97,102, 103,128,129,131
Royalties, 99
Rugosité, 39,40,41,44,120

Safran, 72,124
S.A.N.E., 68,109
Sandia (Laboratoire), 160
Savonius, 17,83,84,85,96,97,149,201

Série (fabrication en), 159,177,178
Serre, 86,105,117,120,121,139
- , effet de, 147
Sillage,
- d'un bâtiment, 42,43,44,45
- d'une hélice, 75,79,89,172
Silos, 80
Site,
- d'implantation, 26,29,30,39,41,84,90 106,107,120,124,148,171,172,174,176
- standard, 44,49,50,51
Solaire, (habitat), 146
- , énergie, (voir Energie)
Solarimètre, 34
Sparco,185
Spectre d'énergie du vent, 117
Stator, 128,129,131
Stockage, 13,48,108,122,146,172,175,182
- thermique, 105,116,119,120?122 127,140,141
Süd-Aéro, 185
Suède, 19,21,23,105,160,193
Suisse, 26,29,30,84,86,150
Sundwind-Energies, 109
Surface rotorique, 26,27,30,108
Surpression, 55,192
Synchrone, 154,157
Synchronisme,158

Tachymétrique, 158
Taux,
- d'actualisation, 25,27
- d'enchérissement, 25,27,143
- d'intérêt, 15,27,143,204
Thermique,
- , énergie, 200
- , machine, 198
- , pertes, 119,120,143
Thermostat, 146
Tip-vane, 202
Tourbillons, 42,54,89,203
Traînée, 54,55,58,60,81,83,84,85,87
Transducteur, 33,34
Triphasé, 138
Troposkien, 89,90,91,126,193
Turbulences, 49,58,79,80,118,120,124,199
Tvind, 111,114, 136,137,138,159

Unicum, 26,30,66,72,81,109,125 127,149
United Technologies Corp. (U.T.C.) 101,195
U.S.A., 22,29,30,31,97,105,117,127,151 160,167, 173,181,195,206

Vent,
- apparent, 56,60
- , direction du, 34,78,83,94,96,195
- , écoulement du, 45,87,94
- , fluctuation du, 44,118
- ,iso-vitesse du, 44,45
- relatif, 55,56,57,58,60,71,87,123
- , séquences de, 48,120
- , spectre d'énergie du, 117
- , valeur moyenne du, 32,33,34,38,43,49
- , variations du, 44,45,78
- , vitesse du, 26,32,33,34,36,42,44,45 48,51,61,76,77,90,96,106,113,119, 120,124,126,141
- , vitesse maximale du, 36
- , vitesse moyenne annuelle du, 30,31,36,37,45,47,48,138,140,142,144,156
- , vitesse de Weibull, 37,40
Venturi, 197,198,200,201,202
Vérin hydraulique, 81,126,148
Vibrations, 18,73,83,92,151,154,155,158
Vitesse,
- angulaire, 33,55,128
- de démarrage, 106,120,141,143,185
- hors service, 106,141,143
- nominale, 30,46,47,76,78,95,106,108 111,112,113,123,124,126,128,133,138,158
- de rotation, 16,33,55,67,73,76,77 83,92,110,111,112,123,126,128,133,138, 158,161,162,182
Vølund, 68,108,159,161,162
Vortex, 196,197,200,201
Vrillage (des pales), 62,74,151,162

Weibull, 37,40,46,47,51,63,143
Winco, 78,151
Wind-Matic, 26,28,29,30,107,150
Wind-Power, 82,150

Les objectifs scientifiques de demain

16. LE MÉTHANOL. Réalités et perspectives, par R. DUMON, J.-C. GUIBET et J.-Y. PORTAS.

15. ÉNERGÉTIQUE ÉOLIENNE. Applications pratiques. Chauffage éolien. Production d'électricité. Pompage, par J. HLADIK.

14. LA VALORISATION CHIMIQUE DU BOIS, par R. DUMON et M. GELUS.

13. GÉOTHERMIE, BASSE ÉNERGIE, Usage direct de la chaleur, par J. VARET.

12. LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DU BOIS ET DE LA BIOMASSE. L'énergie verte, par R. DUMON.

11. LES MICROCENTRALES HYDROÉLECTRIQUES, par L. MONITION, M. LE NIR et J. ROUX.

10. VALORISATION DES DÉCHETS ET DES SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS, par M. MURAT.

9. LE RENOUVEAU DU CHARBON, par R. DUMON.

8. LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES LITS FLUIDISÉS, par R. DUMON.

7. L'EAU SOUTERRAINE EN FRANCE, par J. BODELLE et J. MARGAT.

6. LE PHOSPHORE ET LES COMPOSÉS PHOSPHORÉS, par R. DUMON.

5. LES POMPES A CHALEUR, par R. DUMON et G. CHRYSOSTOME.

4. LA FORÊT. Source d'énergie et d'activités nouvelles, par R. DUMON.

3. FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTROLÉE, par D. BLANC.

2. ÉCONOMIES ET CONVERSIONS D'ÉNERGIES, par R. DUMON.

1. ÉNERGIE SOLAIRE ET STOCKAGE D'ÉNERGIE, par R. DUMON.

9 782225 801570

ISBN : 2-225 - **80157** - 6 MASSON
ISBN : 2-7605 - 0339 - 9 PUQ